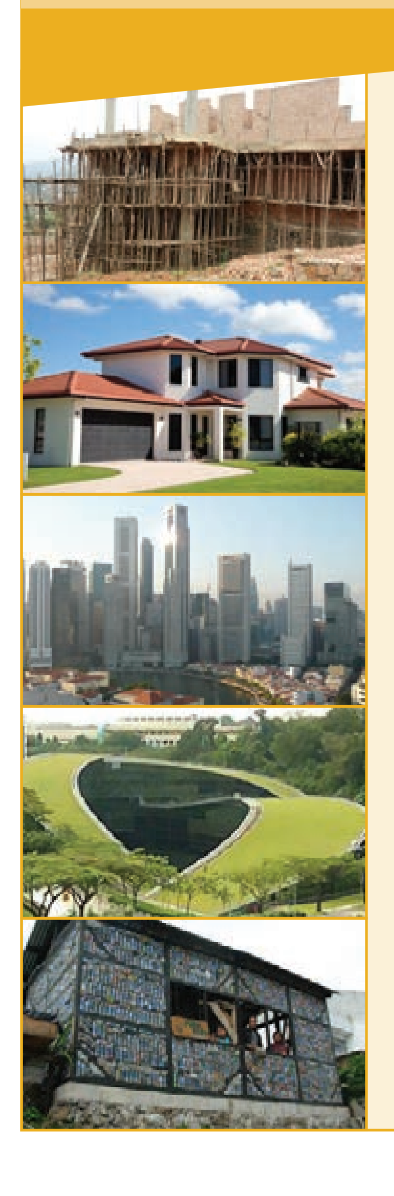
POINTS DE REPÈRE 24



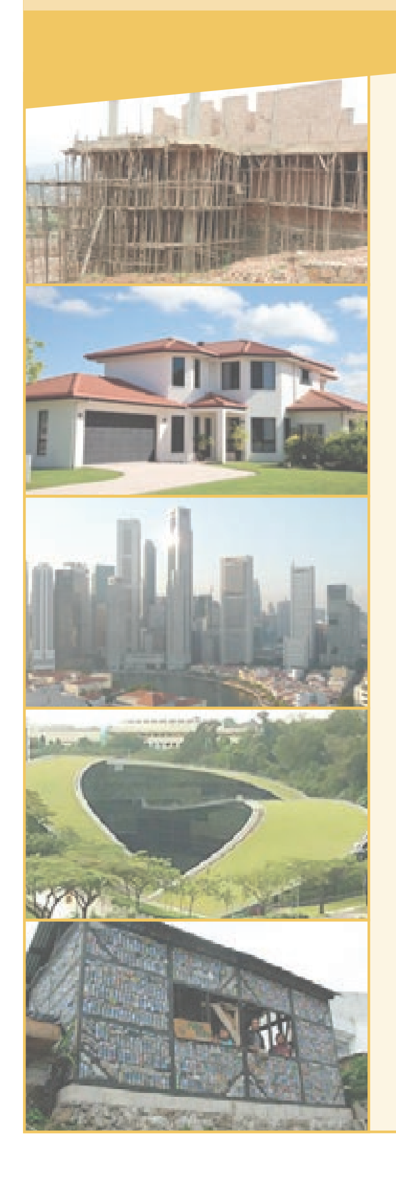
Guide du bâtiment durable en régions tropicales

Tome 1 : Stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales





POINTS DE REPÈRE 24



Guide du bâtiment durable en régions tropicales

Tome 1 :
Stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales





Comité de rédaction et comité éditorial



Direction de la publication
Jean-Pierre Ndoutoum, Directeur de l'IFDD

Direction de la rédaction
Stéphane Pouffary, ENERGIES 2050

Rédaction
Stéphane Pouffary, ENERGIES 2050
Guillaume Delaboulaye, ENERGIES 2050

Équipe de l'Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD) responsable de l'édition
Boufeldja Benabdallah, Spécialiste de programme a.i.,
Politique de l'énergie – Maîtrise et accès à l'énergie – Villes durables
Louis-Noël Jail, Chargé de communication,
responsable du Service Information et Documentation
Marilyne Laurendeau, Assistante de communication

Mise en page et révision linguistique
Interscript inc.

Illustrations
ENERGIES 2050

Photos de couverture
ENERGIES 2050 (Burundi; Singapour), www.wilroof.com.au, Conseil Régional du Cairns, imapermacultura.wordpress.com (Institut Mésoaméricain de Permaculture)

ISBN version imprimée: 978-2-89481-213-6

ISBN version électronique: 978-2-89481-215-0

Vous pouvez consulter ce guide en ligne à: www.ifdd.francophonie.org/ressources/ressources-pub.php?id=8

Avec le soutien de: RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE

56, rue Saint-Pierre, 3e étage, Québec, Canada G1K 4A1
Téléphone: 418 692-5727
Télécopie: 418 692-5644
ifdd@francophonie.org – www.ifdd.francophonie.org

Cette publication a été imprimée sur du papier contenant 100% de fibres postconsommation, procédé sans chlore à partir d'énergie biogaz.recyclé.

IMPRIMÉ AU CANADA

Décembre 2015







Guide du bâtiment durable en régions tropicales

Tome 1 : Stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales

Préface

Notre monde est confronté aux limites de son modèle de développement, comme en témoignent les crises répétées auxquelles nous devons faire face, qu'elles soient d'ordre environnemental, énergétique, social ou économique. Ces crises sont exacerbées par les conséquences des changements climatiques dont l'origine anthropique ne fait aujourd'hui plus guère de doute. Nos modes de consommation et de production ainsi que nos modèles énergétiques, fortement dépendants des énergies fossiles, en sont les principales causes ; l'organisation actuelle de nos sociétés engendre des déséquilibres à tous les niveaux qui ne peuvent être soutenables sur le long terme.

Face à ces défis multiples qui ne peuvent plus être ignorés, nous n'avons d'autre choix que de réussir une transition vers des sociétés plus respectueuses de l'homme et de son environnement. Chacun a compris que le temps n'est plus au plaidoyer mais à l'action concrète pour un changement profond et radical de nos modes de fonctionnement. L'année 2015 constitue, dans ce cadre, une année particulièrement charnière avec :

- l'adoption des Objectifs du Développement Durable en septembre par les Nations Unies, qui prennent la suite des Objectifs du Millénaire pour le Développement pour l'après-2015 ;
- la Conférence des Parties de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques à Paris en novembre-décembre (CdP21), devant aboutir à un nouvel accord international permettant de limiter les impacts liés aux dérèglements du climat.

L'environnement construit (bâtiments et villes), au cœur des enjeux et des défis que rencontrent nos sociétés, est au nœud des changements souhaités. Les villes abritent aujourd'hui plus de 50 % de la population mondiale, consomment les 2/3 de l'énergie produite au plan mondial et contribuent pour autant aux émissions de gaz à effet de serre. Cette énergie est en grande partie utilisée pour les besoins de mobilité et de confort dans les bâtiments (bureaux et logements). Le secteur du bâtiment et de la construction représente à lui seul 40 % de l'énergie totale consommée et environ 35 % des émissions de gaz à effet de serre. À cela s'ajoutent également des impacts considérables sur la consommation de ressources ou encore la génération de déchets.

Ces tendances devraient se maintenir, voire se renforcer. En effet, en 2050, 75 % de la population mondiale vivra dans les villes.

Les choix de développement qui seront faits aujourd'hui à ce niveau, leur organisation spatiale et la façon de les mettre en œuvre détermineront les quantités et la qualité de l'énergie à fournir pour relever les énormes défis de l'accès aux services de base qui se poseront à cet horizon dans les villes, qu'elles soient petites, moyennes ou grandes. L'espace urbain rassemble en effet des systèmes intégrés, organisés selon des schémas complexes et de nature très variée selon que l'on considère les infrastructures, les équipements et les activités génératrices de biens ou de services, ou encore la satisfaction des besoins essentiels d'une population concentrée géographiquement. Il s'agit d'assurer l'accès à l'eau, à l'énergie, à un réseau de transport adapté, à des logements de qualité, à l'alimentation, à la santé, à l'éducation, à la sécurité, à un réseau d'assainissement des eaux usées et de gestion des déchets, à un environnement sain, à un nombre suffisant d'emplois sains et décents, à l'équité sociale ainsi qu'à des notions plus personnelles telles que le bien-être ou le bonheur.

Ces systèmes sont interdépendants et cela est particulièrement visible dès lors qu'il s'agit des réseaux de transport, de gestion des eaux, de la distribution énergétique ou encore des réseaux de communication, et c'est pourquoi il est important de souligner la nécessité d'une approche holistique de la ville tant dans l'analyse des défis qu'elle rencontre que des réponses à apporter.

Ces réponses, de nature variée, sont déterminantes quant au contenu et à la direction à donner à la transition énergétique.

Les professionnels de l'aménagement urbain et de la gestion urbaine, de la construction et du bâtiment sont les principaux artisans des choix à opérer et des réponses à apporter pour que les villes jouent pleinement leur rôle dans cette transition.

Avec de forts effets de blocage dans le futur si rien n'est fait aujourd'hui et, face aux nouveaux enjeux climatiques, l'urgence à agir dans le domaine du bâti est réelle. De plus, cet impératif à l'action immédiate est renforcé par une croissance exponentielle des besoins en constructions, sans précédent dans l'histoire de l'humanité. Cette croissance peut s'expliquer par des facteurs démographiques, avec une population qui dépassera les 9 milliards d'individus d'ici à 2050, mais également par un processus d'urbanisation massif, particulièrement dans les zones tropicales d'Afrique et d'Asie. Selon ONU Habitat les villes africaines accueilleront, en moyenne, 40 000 personnes supplémentaires par jour d'ici à 2025. Ces chiffres permettront à chacun d'imaginer l'ampleur des défis au regard d'une situation qu'aucune société n'a expérimentée en un si court laps de temps.

Les conséquences de ce processus se font d'ores et déjà ressentir dans un grand nombre de pays : multiplication des logements informels insalubres, manque d'accès aux services de base et à l'énergie, gaspillages liés à des conceptions inadaptées des bâtiments, etc., auxquelles viennent s'ajouter des problèmes sécuritaires et d'intégration sociale. Dans certaines parties d'Afrique subsaharienne, le parc de bâtiments pourrait être multiplié par 4 voire 5 d'ici à 2050, alors que cette région, la moins électrifiée au monde, fait déjà face à de sérieux problèmes d'approvisionnement en services et en matières premières.

Si la situation est critique, il convient cependant de ne pas céder à la fatalité. Des solutions existent et les opportunités ayant déjà fait leurs preuves dans l'environnement construit sont considérables. Le GIEC estimait ainsi qu'au niveau mondial, des réductions de 25 à 30 % de la demande énergétique pourraient être atteintes à coûts réduits voire négatifs, et que les économies totales pourraient aller jusqu'à 90 % pour les nouveaux bâtiments[1]. Une intégration des énergies renouvelables dans la conception, couplée à une architecture adaptée et efficace sur le plan énergétique, pourrait ainsi permettre d'atténuer une partie des contraintes auxquelles nous sommes tous collectivement confrontés.

La publication du ***Guide du bâtiment durable en régions tropicales*** s'inscrit dans ce contexte. Ce guide répond également au manque de littérature intégrée existant dans ce domaine pour les zones tropicales, où les méthodes de conception sont trop souvent calquées sur celles des zones tempérées. Il a également pour objectif d'apporter aux professionnels du secteur et aux décideurs des éléments techniques pour la conception des nouveaux bâtiments (tome 1) et pour la rénovation de l'existant (tome 2).

Publié en français, ce Guide s'inscrit dans le cadre des Initiatives francophones pour la promotion des villes durables en Afrique portées par l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF) à travers son organe subsidiaire, l'Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD), et par ses partenaires.

L'espace francophone porte en lui une identité culturelle et historique propice à la réalisation d'actions concertées, et rassemble un nombre important de pays aux contextes différents mais qui sont généralement confrontés à des défis communs et significatifs.

En particulier, ce Guide est une réalisation concrète de l'Initiative de la Francophonie pour des Villes Durables (IFVD) cofondée par l'IFDD et l'association ENERGIES 2050 en 2011. En ce sens, il se veut également une opportunité pour chacun de questionner ses pratiques professionnelles et de s'inscrire dans des dynamiques de développement et d'aménagements résilients, sobres en ressources naturelles et en carbone, porteuses d'un mieux-vivre partagé et générateur d'activités économiques répondant aux critères du développement soutenable.

L'objectif de l'IFVD est de pouvoir apporter des réponses concrètes aux situations critiques auxquelles sont confrontées les villes, qu'elles soient de petite ou de grande taille, et qu'elles se trouvent dans des pays en développement, en transition ou industrialisés. Il s'agit également de tenir compte de la situation de l'habitat précaire, de l'absence d'efficacité énergétique, des difficultés d'approvisionnement, des changements climatiques, etc., tout en prenant en compte la faible contribution des pays en

1. Lucon O. et al, IPCC 2014. *Buildings, Chapter 9 of the Working Group III contribution to the 5th Assessment report « Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change »* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, disponible via http://mitigation2014.org/

développement aux émissions de gaz à effet de serre et leur fragilisation accentuée au regard des conséquences des changements climatiques.

Le ***Guide du bâtiment durable en régions tropicales*** répond ainsi à plusieurs axes stratégiques de cette initiative, notamment sa volonté de mutualiser les connaissances, de s'accorder sur un langage commun avec une indispensable compréhension méthodologique et des indicateurs partagés, ou encore de renforcer la capacité d'agir des acteurs de la ville. Il fait suite à un premier rapport, publié par l'Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie (ancêtre de l'IFDD) en 2006, intitulé « Efficacité énergétique de la climatisation en milieu tropical ».

En considérant le bâtiment comme un système intégré à un environnement local spécifique, et en prenant en compte l'ensemble de son cycle de vie, cet ouvrage apporte des éléments de réponse clairs qui doivent permettre à l'ensemble des parties prenantes de se réapproprier la question du bâti en milieu tropical.

Le temps n'est plus au plaidoyer mais à l'action   il convient collectivement de démultiplier les opportunités d'actions et de témoigner des possibles. Les deux tomes du ***Guide du bâtiment durable en régions tropicales*** s'inscrivent résolument dans cette dynamique.

L'IFDD et ENERGIES 2050
Septembre 2015

Présentation de l'ouvrage

Le ***Guide du bâtiment durable en régions tropicales*** a pour objectif d'apporter des éléments de réponse aux problématiques environnementales, économiques et sociales conséquences d'une urbanisation massive et de pratiques de conception et de construction de bâtiments peu adaptées aux régions tropicales. Il entend servir de référence aux professionnels du secteur de la construction et, plus généralement, de l'environnement construit ainsi qu'aux institutions publiques intervenant dans les régions concernées. Plus largement, il a vocation à donner des clefs de lecture aux enseignants, aux chercheurs et aux étudiants. Il se veut également une invitation à chacun de questionner ses pratiques professionnelles et de s'inscrire dans des dynamiques de développement et d'aménagements résilients, sobres en ressources naturelles et en carbone, porteuses d'un mieux-vivre partagé et générateur d'activités économiques répondant aux critères du développement soutenable.

Ce guide s'articule en deux tomes complémentaires :

Le premier tome est consacré à l'intégration des objectifs de durabilité dans **la conception des nouveaux bâtiments** en régions tropicales. Il traite notamment des stratégies passives de ventilation et d'éclairage ainsi que de la conception des systèmes d'air conditionné. Il se compose de sept chapitres :

Chapitre 1 : Climat et diagrammes bioclimatiques

Chapitre 2 : Stratégies passives dans le bâtiment, bases et concepts

Chapitre 3 : Ventilation et systèmes de refroidissement naturels

Chapitre 4 : Éclairage naturel et intégration avec éclairage artificiel

Chapitre 5 : Systèmes d'air conditionné et climatisation

Chapitre 6 : Énergies renouvelables

Chapitre 7 : Gestion de l'eau.

La climatisation étant l'une des sources majeures de consommation énergétique en régions tropicales, plusieurs chapitres seront axés principalement sur les méthodes visant à limiter la chaleur à l'intérieur du bâtiment et à assurer le confort thermique de ses occupants : prise en compte du microclimat local et intégration avec objectifs de confort (chapitres 1 et 2), conception de systèmes de ventilation et de refroidissement naturels (chapitre 3), éclairage et équipements efficaces (chapitre 4) et enfin conception des systèmes de climatisation (chapitre 5).

Le second tome est complémentaire du premier et se concentre sur l'efficacité énergétique des **bâtiments existants** en régions tropicales.

Il est axé autour de quatre thématiques principales sachant que les chapitres 2 et 3 sont consacrés à la réduction des charges en climatisation :

Chapitre 1 : Établir un diagnostic des performances du bâtiment

Chapitre 2 : Isolation thermique du bâtiment

Chapitre 3 : Systèmes d'air conditionné et climatisation

Chapitre 4 : Éclairage, eau et énergies renouvelables

Il convient de noter que, pour faciliter la lecture du présent document, les références bibliographiques et les sources des illustrations ont été ajoutées à la fin de chaque chapitre.

L'ensemble de l'iconographie a été créée ou adaptée spécifiquement pour les besoins de ce guide afin d'accompagner le lecteur tout au long des deux tomes.

Table des matières

Introduction
Enjeux économiques, sociaux et environnementaux du bâtiment durable

Si le bâtiment durable fait l'objet d'une littérature abondante et peut s'appuyer sur des réglementations, des programmes de certifications spécifiques ou encore des mesures de soutien facilitant son intégration dans un certain nombre de pays, la situation dans les pays situés dans les zones tropicales et plus particulièrement dans les pays en développement et émergents, reste plus problématique. L'urbanisation massive et souvent informelle – couplée à des pratiques de conception et de construction peu adaptées à ces régions[1] – a conduit à de nombreux déséquilibres aussi bien environnementaux (inefficacité énergétique des bâtiments, gaspillage de ressources…) qu'économiques et sociaux (multiplication des bidonvilles, accroissement des inégalités urbaines). Ces impacts sur fond de crise climatique et de besoins en termes de développement, apparaissent insoutenables que ce soit au regard des objectifs du développement durable que de l'utilisation efficace des ressources naturelles ou de la qualité de vie des habitants.

Le ***Guide du bâtiment durable en régions tropicales*** a pour objectif d'apporter des éléments de réponse à ces problématiques et de servir de référence aux professionnels du secteur de la construction et plus généralement de l'environnement construit ainsi qu'aux institutions politiques des régions tropicales. Il s'inscrit comme une suite du rapport « Efficacité énergétique de la climatisation en milieu tropical » publié par l'Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie (IEPF, 2006), en s'attachant à élargir les problématiques traitées et à intégrer l'ensemble des perspectives énergétiques et environnementales.



Photo : Burundi. Crédit : ENERGIES 2050.

Éléments de contexte

Le bâtiment est au cœur de l'organisation économique et sociale de nos sociétés et il représente une source majeure de possibles impacts environnementaux, sociaux et économiques. Dans son cinquième volet sur les politiques d'atténuation du changement climatique, le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) a estimé que le bâtiment était à l'origine de 32 % de la demande énergétique mondiale, dont

1. Joo-Hwa Bay, Boon Lay Ong, 2006, p. 22.

24 % pour le seul secteur domestique, et de 51 % de la demande en électricité[2]. Le secteur dans son ensemble consommerait annuellement plus de 3 milliards de tonnes de matières premières et 12 % de l'eau potable, tandis que la construction, la rénovation et la démolition généreraient plus de 40 % des déchets solides dans les pays développés[3].

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur du bâtiment étaient estimées en 2010 à 9,18 $GtCO_2e$, soit environ un cinquième du total mondial tous secteurs confondus. Sous l'effet combiné de la croissance démographique et d'une urbanisation massive, ces émissions pourraient potentiellement doubler voire tripler d'ici 2050[4]. La population mondiale serait alors d'environ 9 milliards d'habitants avec un taux d'urbains passant de 53 % aujourd'hui à plus de 80 %[5]. Ces chiffres traduisent une empreinte carbone et une contribution significative au changement climatique d'origine anthropique.

Les tropiques : une zone d'action prioritaire

Les zones tropicales, où se trouve une grande majorité des pays en développement et des pays émergents, concentreront une part significative de ces évolutions avec, entre autres, un doublement de la population urbaine sur l'ensemble des pays concernés, qui passera de 2 à 4 milliards d'ici 2030[6]. L'Amérique Centrale et les Caraïbes, une grande moitié Nord de l'Amérique du Sud, la majeure partie de l'Afrique subsaharienne et du sous-continent indien ainsi que l'ensemble du Sud-Est Asiatique figurent en zones tropicales.

S'il est difficile de généraliser la situation compte tenu des disparités régionales et intrarégionales, il est cependant possible d'affirmer que l'ensemble des zones concernées seront particulièrement vulnérables au regard des conséquences d'une mauvaise gestion de l'urbanisation sachant que les conséquences des réchauffements climatiques viendront exacerber des situations déjà fragiles :

- L'Asie rassemble déjà 12 des 21 villes de plus de 10 millions d'habitants et présente les taux de croissance urbaine les plus élevés au monde. Sa population pourrait atteindre 2,6 milliards d'ici 2030 (contre 1,76 milliard en 2010[7]).
- En Afrique, UN Habitat prévoit un doublement de la population et un taux d'urbanisation supérieur à 50 % d'ici 2040, avec un nombre d'habitations domestiques urbaines pouvant tripler de 400 millions à 1,26 milliards d'ici 2050[8]. Les défis sont

2. Lucon O. et al. IPCC, 2014.
3. Chiffres UNEP-SBCI 2010 et Roodman et Lenssen 1995, tirés de UNEP-SBCI 2012, p. 2.
4. Lucon O. et al. IPCC, 2014, p. 11.
5. UNEP-SBCI, 2012.
6. UNEP-SBCI, 2012.
7. UN Habitat 2012a, p. 1.
8. Laros M. et al., 2014, p. 23.

d'autant plus significatifs que 75 % des bâtiments qui seront présents à cette date en Afrique de l'Est n'ont pas encore été construits avec 80 % pour l'Afrique subsaharienne, contre seulement 30 % en Europe[9].

- L'Amérique Centrale, les Caraïbes et l'Amérique du Sud, qui présentent déjà des taux de populations urbaines parmi les plus élevés au monde, avec 80 % sur l'ensemble de la zone, verraient cette proportion avoisiner les 90 % d'ici 2050[10].

Anticiper ces besoins en nouvelles infrastructures et répondre à la demande en ressources qui y sera inévitablement associée est un enjeu majeur pour des pays qui sont déjà confrontés à d'importantes difficultés, que ce soit en termes d'accès à l'énergie ou à des ressources naturelles essentielles. Les questions énergétiques sont centrales et les délestages peuvent être fréquents[11] sans parler de la nécessité de fournir à chacun un accès à une énergie de qualité, abordable et durable. Certaines villes présentent des taux de consommation annuels d'eau équivalents à plus de 80 % de leurs ressources, ce qui est bien au-delà des 40 % fixés par l'UNESCO comme seuil de durabilité[12].

La construction de nouveaux bâtiments à haute qualité environnementale et à haute performance énergétique en milieu tropical est donc un enjeu majeur aujourd'hui et sur le court, moyen et long terme. Les choix d'aujourd'hui impacteront les décennies à venir.

Cette réalité est aussi vraie pour la réhabilitation des bâtiments et infrastructures existantes. Cela est d'autant plus important qu'il s'agit d'un secteur créateur de bénéfices potentiels – également conséquents – qui vont au-delà des questions énergétiques et qui sont la qualité sanitaire du bâtiment ou encore les économies générées sur la durée de vie du bâtiment.



Photo : Togo. Crédit : ENERGIES 2050.

L'application de standards inadaptés, souvent inspirés des normes occidentales qui ont été développées dans d'autres environnements socio-environnementaux climatiques[13], s'est traduite par un usage intensif de la climatisation pour pallier les températures et les taux d'humidité élevés, ainsi que par une usure prématurée des matériaux. Dans un audit de 42 bâtiments non domestiques à Yaoundé et à Douala au

9. Kitio V., 2013, p. 7.

10. UN Habitat, 2012b, p. 19.

11. M. Laros et al., 2014, p. 170 et UN Habitat, 2012a, p. 88.

12. UN Habitat 2012a, p. 11.

13. Joo-Hwa Bay, Boon Lay Ong, 2006, p. 22.

Cameroun, Kemajou et al.[14] ont ainsi pu observer certaines incohérences des constructions en milieu tropical : architecture moderne disposant de larges baies vitrées, peu isolantes, non protégées, et orientation du bâtiment favorisant les gains de chaleur.

De manière plus globale, l'inadéquation des politiques de la ville et la rapide urbanisation des pays en développement (PED) des zones tropicales ont créé de nombreuses disparités sociales, notamment via la prolifération de bidonvilles et d'habitats informels où s'entassent les plus pauvres, généralement à la périphérie des villes. 800 millions au total manqueraient ainsi d'accès à une habitation décente, particulièrement en PED où un tiers de la population serait concernée[15].

En Asie, plus de 40 % des ménages vivraient ainsi dans des conditions insalubres, avec une surexposition aux problèmes environnementaux et de santé, un manque d'accès aux services de base (eau potable, électricité, soins de santé…) et une dépendance aux énergies polluantes néfastes pour la santé telles que le charbon ou le gasoil[16]. 50 % des habitations informelles en Afrique dépendraient également de ces énergies, notamment pour cuisiner[17], alors qu'1,3 milliard de personnes n'ont pas accès à l'électricité dans le monde[18]. La pénurie de logement concernerait par ailleurs plus de 50 % des ménages dans certains pays tels que le Nicaragua ou le Honduras[19].

Rationaliser dès à présent le secteur de l'environnement construit en s'appuyant sur des pratiques durables permettrait, sans aucun doute, de soulager un nombre significatif de contraintes. Une planification territoriale adaptée complétée par des bâtiments performants constitue un enjeu essentiel sachant que toute erreur d'aujourd'hui aura des conséquences sur des décennies compte tenu de la durée de vie d'un bâtiment ou d'un aménagement urbain.

Introduction au concept de bâtiment vert et de bâtiment durable

L'objectif premier d'un bâtiment vert est de mettre en œuvre des stratégies intégrées permettant de limiter l'impact environnemental du bâtiment, notamment au travers d'une meilleure efficacité énergétique et d'une meilleure utilisation des ressources naturelles tout en contribuant à un plus grand confort intérieur. Ces stratégies peuvent être qualifiées de passives dès lors qu'elles utilisent les spécificités du climat ou du terrain (pour l'éclairage ou la ventilation naturelle par exemple) ou actives à travers l'utilisation de technologies avancées utilisant des énergies renouvelables décentralisées ou des

14. Kemajou A., Mba L., Pako Mbou G., 2012.
15. Lucon O. et al., IPCC 2014, p. 11, tiré de UN Habitat 2010.
16. UN Habitat, 2012a, d'après Banque Asiatique de Développement (ADB), 2010.
17. M. Laros et al., 2014, p. 34.
18. Lucon O. et al. IPCC 2014, pp. 4-17, tiré de IEA, 2012 et Pachaury et al., 2012.
19. UN Habitat, 2012b, Chapitre 3.

appareils électriques plus économes en énergie[20]. Une bonne conception cherchera cependant une synergie et une complémentarité de ces deux approches, avec différents éléments à prendre en considération sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment : orientation et architecture, utilisation de matériaux durables locaux, gestion optimale des déchets, intégration dans l'environnement, volume et protection des fenêtres, ventilation, architecture permettant l'utilisation d'énergies renouvelables, isolation, etc.

Selon le GIEC, le bâtiment présente les opportunités les plus intéressantes en termes d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, avec des réductions de 25 à 30 % de la demande énergétique avec des aménagements réalisables à coûts réduits voire négatifs, et des économies totales pouvant aller jusqu'à 90 % dans les nouveaux bâtiments (comparé aux standards classiques) et 75 % pour les infrastructures existantes[21]. À noter que la notion de « coûts négatifs » signifie que certains investissements sont rentables immédiatement par opposition à des investissements qui généralement demandent plusieurs années avant d'être rentables.

En milieu tropical, des applications concrètes ont déjà démontré ce potentiel. À titre d'exemple, le « Low Energy Office », un bâtiment administratif en Malaisie, a ainsi atteint des économies de plus de 50 % au travers de mesures peu coûteuses telles qu'une meilleure orientation des fenêtres, elles-mêmes équipées de mécanismes d'ombrage automatiques, ainsi qu'une isolation accrue du toit[22]. Au Cameroun, sur les 42 bâtiments audités par Kemajou et al.[23], des économies d'énergie de 30 % seraient réalisables avec un retour sur investissement inférieur à deux ans en agissant sur la demande d'air conditionné.

Les bâtiments verts pourraient, par ailleurs, permettre une réduction dans la production de déchets de 70 % et dans la consommation d'eau de 40 %[24] par rapport aux standards de 2010. Combinées à des changements comportementaux, les synergies entre stratégies actives et passives pourraient ainsi contribuer à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre du bâtiment à leur niveau actuel en 2050, soit une réduction annuelle de l'ordre de 9 à 18 GtCO2e comparé aux projections de base du GIEC[25].



Photo : Singapour. Crédit : ENERGIES 2050.

20. UNEP-SBCI 2012.

21. Lucon O. et al. IPCC 2014.

22. Chiffres Asia Business Council disponibles dans UN Habitat 2012a, p. 32.

23. Kemajou A., Mba L., Pako Mbou G., 2012.

24. McGraw-Hill Construction, 2008.

25. Lucon O. et al. IPCC 2014, p. 59.

Des avantages économiques et sociaux

Le bâtiment durable reprend les objectifs initiaux du bâtiment vert en incluant également des perspectives plus globales, notamment économiques et sociales.

Un enjeu économique de taille

Poussé par la rapide urbanisation des pays en développement et des pays émergents, le secteur du bâtiment représente un enjeu économique majeur. 4 700 milliards de dollars US seront nécessaires pour financer les nouvelles infrastructures liées au développement urbain annoncé en Asie, et 1 600 milliards supplémentaires pour la réhabilitation de celles déjà existantes[26]. Pour certaines nations d'Amérique Centrale et dans les Caraïbes, le secteur de la construction peut représenter jusqu'à 13 % du Produit Intérieur Brut[27]. Une bonne ou une mauvaise gestion de ce secteur aura donc d'importantes répercussions sur le développement économique de ces pays et sur leurs politiques de développement durable.

Une réduction des coûts

Un des avantages non négligeables de la construction durable est une baisse des coûts sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Selon McGraw-Hill construction, les coûts de construction des bâtiments verts seraient ainsi réduits de 8 à 9 % pour un accroissement de la valeur du bâtiment de 7,5 %[28]. En dépensant moins dans l'énergie et l'entretien, les résidents réaliseront des économies significatives qui pourront être réinvesties dans d'autres dépenses. Il s'agit d'un point particulièrement important pour les logements sociaux et qui permettrait de diminuer les problèmes de pauvreté énergétique en diminuant le coût de fonctionnement d'un logement.

Pour finir, en adaptant la structure du bâtiment aux futurs impacts du changement climatique (par exemple aux risques d'inondations ou aux augmentations des températures), il est également possible d'accroître sa résilience et d'économiser sur les futurs coûts de réhabilitation ou de réparation des dégâts causés.

Effets sur l'emploi

Selon l'UNEP ou encore l'Office International du Travail, le secteur de la construction représente déjà 5 à 10 % de l'emploi et 10 % du Produit Intérieur Brut au niveau mondial[29]. Même s'il est difficile de calculer l'effet net du bâtiment durable dans ce domaine, UN Habitat estime que chaque million de dollars US investit dans les constructions vertes ou dans la réhabilitation en Asie créerait de 10 à 14 emplois directs, ainsi que

26. UN Habitat 2012a, p. 28.
27. UN Habitat, 2012b, p47, chiffres Cepalstat.
28. McGraw Hill construction, via UNEP-SBCI 2012.
29. Chiffres UNEP/OIT cités dans UNEP-SBCI 2012.

de 3 à 4 emplois indirects[30]. Par ailleurs, selon la Confédération Syndicale Internationale, une croissance des emplois verts, qui pourraient atteindre 100 millions dans le monde dans les 20 prochaines années, pourrait contribuer à diminuer la pauvreté et à accroître le bien-être social[31].

Sécurité énergétique

La mise en place de programmes basés sur une urbanisation durable peut contribuer à réduire la contrainte énergétique des pays émergents ou en développement, souvent largement dépendants des énergies fossiles importées. Parmi les possibles bénéfices figurent un meilleur fonctionnement du réseau électrique grâce au développement des énergies décentralisées et à la réduction de la demande et des charges maximales, une plus grande diversité dans les sources d'énergies disponibles et une utilisation accrue des ressources domestiques[32].

Santé, qualité de vie et productivité

La meilleure qualité de l'air intérieur et le confort accru ont également un impact significatif sur les dépenses de santé, la qualité de vie et, d'une manière générale, la productivité des personnes. Cela concerne notamment les problèmes respiratoires ou les problématiques de stress auxquels sont particulièrement sensibles les populations les plus démunies. Les gains de productivité dans les bâtiments verts pourraient ainsi être de l'ordre de 1 à 9 % et la santé des résidents serait également améliorée par un meilleur accès aux énergies propres[33].

Soutien à l'économie locale

D'une manière générale, le bâtiment durable peut également permettre un plus grand soutien aux économies locales (utilisation de matériaux locaux, utilisation des compétences locales adaptées à l'environnement, etc.), une diminution des tensions sociales et une meilleure prise en considération de l'économie informelle, qui représente souvent un pan non négligeable de l'économie et de l'emploi[34] dans les pays en développement situés en milieu tropical. Le bâtiment



Sainte Lucie. Crédit : ENERGIES 2050.

30. UN Habitat 2012a, p. 28.
31. Chiffres disponibles via UNEP-SBCI 2012 et Keivani et al., 2010.
32. Lucon O. et al., IPCC 2014, Chapitre 9.
33. Lucon O. et al., IPCC 2014, Chapitre 9.
34. UNEP-SBCI 2012 ; UN Habitat 2012a, et UN Habitat 2012b.

peut également s'intégrer dans des plans d'urbanisation durables qui stimuleront davantage les investissements dans les infrastructures et les transports publics et favoriseront l'intégration sociale. Enfin, le logement social durable peut permettre une meilleure prise en compte de la pauvreté dans les politiques urbaines et limiter l'expansion des bidonvilles et des habitats insalubres informels. C'est notamment un des objectifs du programme SUSHI (Sustainable Social Housing Inititative)[35] du Programme des Nation Unies pour l'Environnement.

Des barrières structurelles à dépasser

Si les opportunités offertes par le bâtiment durable en zones tropicales sont majeures, de nombreuses barrières pourraient limiter l'efficacité des politiques mises en place. Le GIEC a identifié certaines de ces barrières, notamment le manque d'accès à l'information et le manque de connaissance des enjeux, le manque de capital et les coûts de transactions élevés, une régulation inexistante ou inappliquée, les aspects culturels, les barrières comportementales, la protection de la propriété intellectuelle sur les matériaux et les technologies innovantes ou encore la nécessité d'une coopération élevée entre tous les acteurs du bâtiment dans un secteur généralement très fragmenté[36].

Dans les tropiques, le manque de fonds et de technologies nécessaires à la mise en œuvre de bâtiments verts, associé à un fort taux d'actualisation – c'est-à-dire une forte préférence pour le présent liée, par exemple, à l'inflation anticipée ou réelle qui dévalue la valeur perçue des économies réalisées dans le futur – et à un manque d'information et de qualifications, rend parfois difficile l'application des principes du bâtiment durable, y compris ceux qui seraient rentables à très court ou à moyen terme[26]. Un changement comportemental et du paradigme actuel régissant le secteur de la construction est nécessaire. Watson (2009)[37] cite dans son étude des principes généraux tels que :

- La réhabilitation des habitations informelles plutôt que la construction de gratte-ciel ou de bâtiments « modernes » ;
- La mise en valeur des marchés traditionnels plutôt que la construction de centres commerciaux particulièrement énergivores ;
- Des programmes visant véritablement la lutte contre la pauvreté plutôt que son exclusion hors des centres urbains pour préserver l'image de la ville.

De manière plus globale, les politiques d'urbanisation devront donc accorder une plus grande attention aux populations démunies et à la préservation du secteur économique informel.

L'urbanisation et la croissance démographique massives caractérisant les zones tropicales, ainsi que l'inadéquation des politiques urbaines actuelles et les difficultés

35. http://www.unep.org/sustainablesocialhousing/ (consultation novembre 2014).

36. Lucon O. et al., IPCC 2014, Chapitre 9.

37. Watson, 2009, cité dans UN Habitat 2012a.

également rencontrées par les pays en développement de ces zones en matière d'approvisionnement énergétique et en ressources, font du bâtiment en zone tropicale un enjeu majeur de la lutte contre les conséquences des changements climatiques et de la promotion d'un développement soutenable.

Le ***Guide du bâtiment durable en régions tropicales*** s'inscrit dans une dynamique de changement et a vocation à apporter un soutien et une source d'information à l'attention des différents acteurs de la construction, qu'ils soient privés ou publics.

Si les tendances actuelles ne poussent pas à l'optimisme et ont conduit, au-delà d'impacts environnementaux lourds, à la prolifération des habitats informels et des bidonvilles ainsi qu'à un accroissement des inégalités, le bâtiment représente le secteur le plus prometteur en termes d'opportunités d'atténuation du changement climatique, de développement économique et de réduction des tensions sociales. Il offre également une précieuse contribution dans la prise en compte des enjeux de l'adaptation aux conséquences des changements climatiques tout en augmentant la résilience de l'environnement construit. Une bonne planification, anticipant les besoins considérables à venir, permettra d'éviter d'avoir à « compenser » demain et sur plusieurs décennies, les impacts néfastes d'infrastructures inadaptées.

Références

Banque Asiatique de Développement (ADB), 2010. *Access to justice for the urban poor: toward inclusive cities*, disponible via : http://www.adb.org/sites/default/files/publication/27487/access-justice.pdf

IEA, 2012. *CO_2 emissions from fossil fuel combustion*. Beyond 2020 online database. Agence Internationale de l'Énergie, disponible via : http://data.iea.org

IEA, 2013. *Services de données en ligne de l'Agence Internationale de l'Énergie,* disponible via http://www.iea.org/statistics/

Joo-Hwa Bay, Boon Lay Ong, 2006. *Tropical Sustainable Architecture, Social and Environmental Dimensions*, publié par Elsevier Ltd., Oxford, Royaume-Uni, disponible via http://www.academia.edu/4549289/22283161_Tropical_Sustainable_Architecture

Kemajou A., Mba L., Pako Mbou G., 2012, *Energy Efficiency in Air-Conditioned Building in the Tropical Humid Climate*, Laboratory of Refrigeration and Air Conditioning, Advanced Teachers Training College for Technical Education, Université de Douala, Douala, Cameroun, disponible via http://www.arpapress.com/Volumes/Vol11Issue2/IJRRAS_11_2_07.pdf

Keivani R., Tah J.H.M., Kurul E., Abanda H., 2010. *Green jobs creation through sustainable refurbishment in the developing countries*, ILO Publications, International Labour Office, Geneva, Switzerland, disponible via http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/documents/publication/wcms_160787.pdf

Kitio V., 2013. *Promoting Energy Efficiency in Buildings in East Africa*, UNEP SBCI Symposium 25-26 November 2013 Paris, Global Action towards Resource Efficiency and Climate Mitigation in the Building Sector, disponible via http://www.unep.org/sbci/pdfs/PromotingEEBEastAfrica.pdf

Laros M. et al., 2014. *UN Habitat, The State of African Cities, Re-imagining sustainable urban transitions, Chapter 1 (overview)*, United Nation Settlements Programme, Nairobi, Kenya, disponible via http://unhabitat.org/the-state-of-african-cities-2014/

Lucon O. et al, IPCC 2014. *Buildings, Chapter 9 of the Working Group III contribution to the 5th Assessment report « Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change »* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, disponible via http://mitigation2014.org/

McGraw-Hill Construction, 2008. *Global Green Building Trends : Market Growth and Perspectives from Around the World,* McGraw-Hill Construction, SmartMarket Report [Auteurs : Bernstein, H.M. et Bowerbank, A.].

Pachauri S., A. Brew, Hammond, D.F. Barnes, S. Gitonga, V. Modi, G. Prasad, A. Rath, H. Zerriffi, et J. Sathaye, 2012. *Chapter 19 : Energy Access for Development* – IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Autriche.

Roodman, D. et Lenssen, N., 1995. *Worldwatch Paper 124 : A Building Revolution : How Ecology and Health Concerns are Transforming Construction*. Worldwatch Institute.

UNEP-SBCI, 2010. *Draft briefing on the sustainable building index*. United Nations Environment Programme, Sustainable Buildings and Climate Initiative, Paris. Disponible via : http://www.unep.org/sbci/pdfs/SYM2010-UNEP-SBCI_SB_Index_Briefing.pdf

UNEP-SBCI, 2012. *Conception et Construction des bâtiments, à l'avant-garde de l'utilisation efficiente des ressources et du développement durable,* Programme des Nations Unies pour l'Environnement Division Technologie, Industrie et Économie.

UN Habitat, 2010. *State of the World's Cities 2010/2011*. UN-HABITAT, 224 pp.

UN Habitat, 2012a, *Sustainable Urbanization in Asia, A sourcebook for local governments*, United Nations Settlements Programme, Nairobi, Kenya, disponible via http://mirror.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=3345

UN Habitat, 2012b. *State of Latin America and Caribbean Cities 2012, towards a new urban transition*, United Nations Settlements Programme, Nairobi, Kenya, disponible via http://mirror.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=3386&AspxAutoDetectCookieSupport=1

UNIDO, REEP, 2007. *Module 18 : Energy Efficiency in Buildings, Sustainable Energy Regulations and Policy Making for Africa*, disponible via https://www.unido.org/fileadmin/media/documents/pdf/EEU_Training_Package/Module18.pdf

UNSHP, 2010. *The Challenge of Slums, Global report on Human settlements 2010*, Earthscan publications, London, Sterling, VA.

Watson, V., 2009. *The planned city sweeps the poor away : urban planning and the 21st century urbanisation*. Progress in Planning, 72, 151-193.

Site internet

Programme SUSHI (Sustainable Social Housing Inititative) du Programme des Nations Unies pour l'Environnement : http://www.unep.org/sustainablesocialhousing/

Chapitre 1
Climat et diagrammes bioclimatiques

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter les différents outils d'analyse des paramètres climatiques locaux dans le cadre de la conception du bâtiment, ainsi que leurs implications en termes de confort hygrothermique.

1.1 Les climats tropicaux : principales caractéristiques et zones géographiques

Les climats tropicaux englobent une zone géographique assez vaste qui s'étend du tropique du cancer à celui du capricorne, soit à 14° de latitude Nord et Sud autour de l'Équateur. Y figurent, notamment, l'ensemble des Caraïbes et de l'Amérique Centrale, une large moitié Nord de l'Australie et de l'Amérique du Sud ainsi que la majeure partie de l'Afrique subsaharienne, du sous-continent indien et de l'Asie du Sud-Est.

Deux critères principaux caractérisent un climat tropical, selon la classification du météorologue Köppen : les précipitations, avec un climat non aride, et les températures avec des moyennes mensuelles devant dépasser les 18°C. Derrière cette classification,

Illustration 1.1 : Carte des zones tropicales

Source : Institut d'Architecture Avancée de Catalogne (consultation du site novembre 2014).

3 sous-types de climats tropicaux peuvent néanmoins être distingués en fonction des précipitations : climats équatoriaux, climats humides et secs (savane), et climats de mousson[1].

Illustration 1.2 : Classification des climats selon la classification Köppen-Geiger mise à jour

Source : Kottek M. et al., 2006.

1.1.1 Climats équatoriaux (Af sur la carte)

Ceux-ci sont généralement situés entre 5 et 10 degrés de latitude autour de l'Équateur et sont notamment caractérisés par de fortes températures (25 à 27°C) et des précipitations continues tout au long de l'année. Celles-ci descendent rarement en deçà de 60 mm par mois et sont supérieures à 2 000 mm sur l'année. Parmi les zones concernées figurent notamment une partie de la côte pacifique de l'Amérique Centrale et les Caraïbes, le bassin de l'Amazone, une partie du Brésil, de la Colombie, le bassin du Congo et la côte Est de Madagascar en Afrique et l'archipel Malais, Bornéo, la Nouvelle Guinée ou encore l'Indonésie et les Philippines en Asie.

1.1.2 Climats humides et secs (As et Aw)

Les climats tropicaux humides et secs ont deux saisons distinctes (sèche et humide) arrivant à intervalles réguliers, avec des variations de températures modérées tout au long de l'année. Les précipitations restent inférieures à 60 mm par mois et en deçà

1. Kottek M. et al., 2006.

des 1 000 mm par an. Les climats humides et secs se retrouvent sur une grande partie de l'Amérique du Sud, au cœur du continent Africain, sur une partie Nord de l'Australie ainsi qu'au Sud de l'Asie.

1.1.3 Climats de moussons (Am)

Le climat de mousson est influencé par un système de vents saisonniers qui soufflent alternativement (par périodes de 6 mois) de la mer vers le continent ou du continent vers la mer. Dans l'Ouest du sous-continent indien par exemple, la mousson d'été est caractérisée par une forte humidité/précipitation provenant de l'Océan Indien, avec orages violents, alors que la mousson d'hiver (vents du Nord-Est) s'accompagne d'un temps froid et sec. Le volume des précipitations atteint régulièrement plus de 1 000 mm sur deux mois consécutifs durant l'été suivi d'une saison plus ou moins sèche en fonction des régions. Ces climats concernent également une partie de l'Afrique Centrale et du Nord de l'Amérique du Sud.

Un bâtiment durable doit pouvoir s'adapter au mieux à ces climats, avec une architecture et des normes différenciées et distinctes des pratiques observées dans d'autres régions, en particulier celles des climats tempérés. Dans ce guide, nous ferons principalement la distinction entre climat tropical humide (climats équatoriaux notamment) et climat tropical sec, même s'il conviendra d'adapter les conseils en fonction, par exemple, de l'altitude (climats plus frais voire froids).

1.2 Les principaux paramètres climatiques à prendre en compte lors de la conception d'un bâtiment

Cinq paramètres climatiques doivent faire l'objet d'une attention particulière lors de la conception d'un bâtiment :

- les températures extérieures,
- l'humidité,
- l'ensoleillement,
- la course du soleil,
- les vents.

Ces paramètres sont, en outre, influencés par un ensemble de variables comme la topographie ou les activités urbaines, ces paramètres peuvent néanmoins varier à une échelle très réduite, parfois inférieure à une centaine de mètres (microclimats).

1.2.1 Les températures extérieures

Les zones tropicales sont souvent caractérisées par des températures extérieures élevées en journée impactant le confort interne des bâtiments et pouvant conduire, de fait, à un usage intensif des systèmes d'air conditionné. Les variations de températures

sont également à considérer et à anticiper afin d'adapter l'inertie thermique du bâtiment aux conditions locales. Nous reviendrons sur ces différents points plus tard dans cet ouvrage.

Les données sur les températures, telles que les valeurs maximales, minimales ou encore les moyennes sur une période définie (jour, mois, année), sont généralement bien documentées et accessibles. Toutefois, au-delà de ces données, un certain nombre de paramètres, qui influent sur le niveau des températures à une échelle locale, seront à considérer.

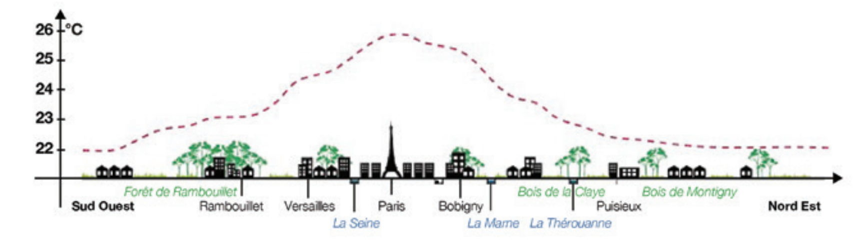
Topographie

La topographie, et plus particulièrement l'altitude, peut avoir un impact important sur les températures, la pression atmosphérique ou encore l'humidité absolue de l'air. Chaque élévation du terrain de 100 mètres s'accompagne en moyenne d'un décroissement proportionnel des températures de 1°C, selon la BBC (British Broadcasting Corporation)[2]. Lors des nuits plus fraîches en altitude, un refroidissement du sol peut également amener l'apparition d'une couche d'air froid au ras de la surface. Celle-ci redescend en aval et est collectée au pied des vallées ou des montagnes, mais également au sein de dépressions du sol, créant des lacs ou des blocages d'air froid.

Urbanisation

Les températures peuvent également varier en fonction de l'environnement immédiat du site et notamment de la densité urbaine. Cette densité crée des îlots de chaleur urbains plus ou moins élevés selon la morphologie du territoire et les matériaux utilisés. Sont ici en cause l'effet d'activités humaines plus concentrées et productrices de chaleur (par exemple industries, transports), une plus grande absorption des radiations solaires (effet albédo, par exemple lié aux revêtements des voies en goudron noir) et des blocages à la circulation de l'air et aux vents.


Illustration 1.3 : Représentation de l'îlot de chaleur parisien



Source : Descartes, 2009.

2. BBC (British Broadcasting Corporation) (consultation du site novembre 2014).

Effet d'albédo et caractéristiques des sols

D'une manière plus générale, la composition des sols et leurs propriétés plus ou moins réflectives auront également une influence, notamment via l'interaction entre températures du sol et températures de l'air. Ces gains de chaleur peuvent être atténués via l'utilisation de matériaux à fort coefficient de réflexion ou en utilisant des protections naturelles telles que la végétation.

1.2.2 L'humidité relative

L'humidité influence le confort interne d'un bâtiment et l'utilisation des systèmes d'air conditionné, particulièrement en milieu tropical humide et d'autant plus lorsqu'elle n'a pas été prise en considération dès la conception du bâtiment. L'humidité relative se définit comme le ratio de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air rapportée à la valeur maximum d'humidité contenue avant que ne démarre le processus de condensation, et est exprimée en pourcentage. Ce ratio varie généralement en fonction inverse des températures, avec un accroissement durant la nuit et un décroissement lorsque les températures augmentent en journée.

Tout comme les températures, l'humidité relative est le résultat d'interactions complexes et dépend non seulement du climat mais aussi :

- **de l'environnement** : la présence de végétation et de points d'eau (océans, mers, lacs, rivières) accroît l'humidité, respectivement au travers des processus d'évapotranspiration et d'évaporation. L'humidité est donc généralement moins forte en zone urbaine dense, de 6 % en moyenne[3].
- **de la topographie** : les températures moins élevées sur les versants ombragés des montagnes ou au bas d'une vallée conditionnent généralement une humidité relative plus élevée.

1.2.3 L'influence du soleil

Le soleil peut avoir de nombreux effets sur un bâtiment, son confort interne et sa consommation énergétique. Afin de prédire au mieux son impact et de l'intégrer dans la conception du bâtiment, trois données doivent être considérées :

- La position du soleil dans le ciel et l'angle qu'il crée avec les surfaces du bâtiment ;
- La quantité d'énergie radiante reçue au niveau du sol et des autres surfaces ;
- Les obstructions et les réflexions pouvant être causées par les nuages, la topographie et l'environnement immédiat, notamment l'urbanisation[4].

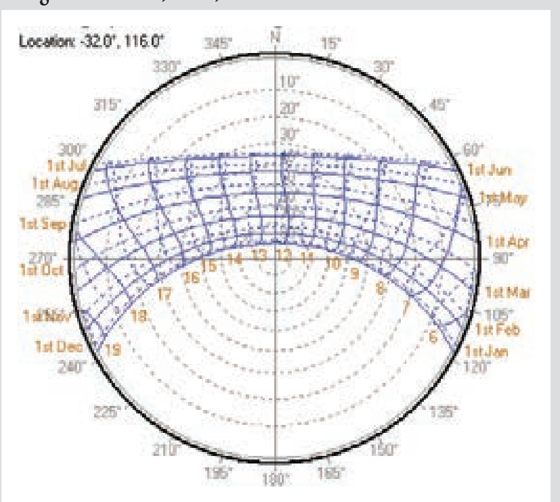
3. Waugh D., 2000, p. 242.
4. McMullan R., 2007, p. 285.

Si la trajectoire du soleil à travers le ciel, et donc son angle d'incidence par rapport aux surfaces du bâtiment, est sans cesse changeante, celle-ci peut néanmoins être prédite avec précision grâce à la géométrie et à l'utilisation de diagrammes solaires.

Encadré 1.1 : Le diagramme solaire

Les diagrammes solaires sont utilisés pour prédire la trajectoire du soleil tout au long de l'année en fonction d'une position géographique spécifique. Dans le cadre de la conception du bâtiment, cela permet d'anticiper l'angle d'incidence du soleil avec les différentes parois et son exposition à la lumière naturelle et aux radiations. Les cercles concentriques représentent la hauteur du soleil (en degrés par rapport au plan) ; sur le cercle périphérique est reporté l'azimut et la trajectoire du soleil est indiquée pour différentes dates et à différentes heures de la journée.

Illustration 1.4 : Diagramme solaire, Perth, Australie



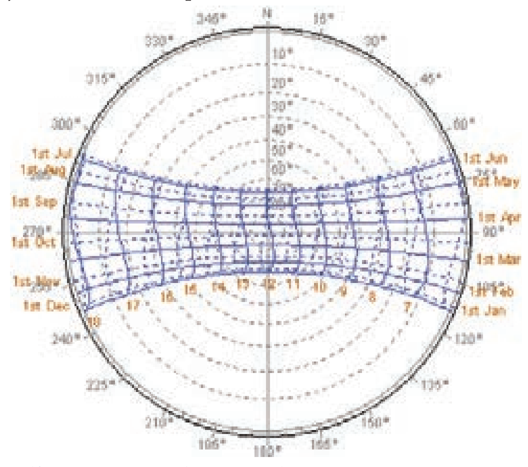
Source : http://wiki.naturalfrequency.com (consultation novembre 2014).

Dans l'exemple ci-dessus, il est ainsi possible de constater, en plaçant le bâtiment au centre du diagramme, que le soleil aura une trajectoire Nord-Est/Nord-Ouest avec un angle d'incidence maximum de 35° par rapport à une surface plane en juin (hiver austral), contre plus de 80° (légèrement Nord, avec une trajectoire Sud-Est/Sud-Ouest) en été. Les parois sud seront protégées des rayonnements directs du soleil tout au long de l'année, alors que celles à l'Est, à l'Ouest et au Nord ainsi que les toits seront les plus exposés.

La prise en compte de la trajectoire du soleil dans la conception du bâtiment est une donnée importante notamment pour limiter les gains d'énergie solaire, assurer le confort (y compris visuel) des occupants tout au long de la journée et de l'année, ou encore pour l'installation de technologies d'énergies renouvelables de type photovoltaïque.

Contrairement aux latitudes éloignées de l'Équateur, les variations de trajectoires solaires sont relativement limitées en milieu tropical, avec une altitude du soleil supérieure à 30° environ 75 % du temps.

Illustration 1.5 : Trajectoire du soleil à l'Équateur



Source : http://wiki.naturalfrequency.com (consultation novembre 2014).

Les façades Est et Ouest ainsi que les toits (angle de 70° minimum en milieu de journée) seront ici les surfaces les plus exposées aux rayonnements solaires.[5]

1.2.4 Radiations solaires

Directement influencées par la position du soleil dans le ciel, et quatrième paramètre climatique à considérer lors de la conception du bâtiment, les radiations solaires peuvent varier en fonction des climats mais aussi des conditions topographiques, géographiques et atmosphériques, et du temps (saison, heure). Le soleil émet des radiations dont l'intensité atteignant une surface peut être mesurée en Watt par m^2, un Watt étant égal à 1 Joule par seconde. L'intensité des radiations solaires correspond donc à une mesure directe de l'énergie solaire reçue chaque seconde par m^2 de la surface considérée. Au sein d'un même climat, différents facteurs vont impacter l'ampleur des radiations :

5. Pour obtenir un diagramme solaire de votre localisation, visitez www.gaisma.com (consultation novembre 2014).

Topographie

À une altitude élevée, la distance parcourue par les rayons du soleil dans l'atmosphère est réduite et les radiations solaires augmentent. Les obstructions naturelles telles que les montagnes ou les collines, mais également la végétation ou les infrastructures urbaines, peuvent également avoir une influence, y compris via la formation de nuages au sommet des montagnes ou sur le versant des collines.

Composition atmosphérique

La composition atmosphérique joue un rôle assez similaire aux nuages : le montant de particules (incluant pollution urbaine) et de vapeur d'eau présents dans l'atmosphère atténue les radiations solaires et les rend plus diffuses.

Zones côtières

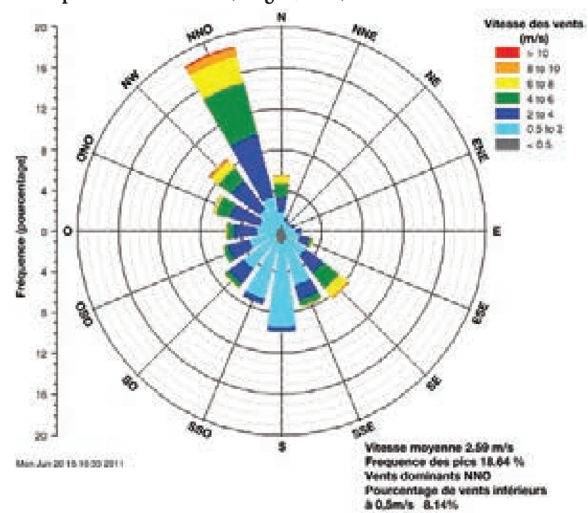
Le montant des radiations peut également varier en fonction des vents marins qui amènent souvent la formation de nuages vers l'intérieur des côtes. Les zones côtières ont également une turbidité plus élevée à cause de la présence d'aérosols et de sels qui impacte le volume de radiations directes. Les vents marins peuvent enfin avoir un effet inverse en diminuant l'effet convectif des nuages et donc en accroissant le montant de radiation solaire reçu.

1.2.5 Les vents

Les vents peuvent avoir un impact sur le bâtiment, notamment en termes de pertes thermiques et de pénétration des eaux de pluie. Les vents sont une circulation d'air provoquée par les différences de pression atmosphérique liées aux gradients de températures des sols, de l'air ou des eaux qui se produisent à des niveaux régionaux ou locaux. Ils sont généralement caractérisés par différents paramètres, notamment vitesse, direction et fréquence, qui peuvent être représentés graphiquement dans une rose des vents. Cet outil montre la fréquence des vents au travers de rayons plus ou moins longs s'étendant vers les points cardinaux correspondants à leurs directions spécifiques[6].

6. Les directions des vents à un site donné (généralement mesurées à 10 m de hauteur à l'aéroport le plus proche) peuvent dans la plupart des cas être obtenues via des sites météorologiques. Il suffit ensuite de l'appliquer graphiquement sur une rose des vents.

Illustration 1.6 : Exemple de rose des vents (Oregon, USA)



Source : ENERGIES 2050, d'après le Gouvernement du New Jersey, US Geological Survey (consultation du site novembre 2014).

Vents locaux

Au-delà de la circulation d'air au niveau régional, des vents locaux peuvent se produire sous l'effet de gradients de pressions créés par des environnements divergents d'un point de vue thermique. Dans certains cas, comme les vents de mer, de lacs ou de montagnes et de vallées en été, ces mouvements d'air peuvent être anticipés.

- **Vents de côtes :** La terre ayant une capacité thermique spécifique supérieure à celle de la mer, elle s'échauffe plus rapidement sous l'effet du soleil. À mesure que l'air chaud au-dessus du sol s'élève, une zone de basse pression au niveau du sol se crée, dans laquelle vient s'engouffrer l'air marin (brise de mer). L'inverse se produit durant la nuit (brise de terre), avec des vents soufflant de la terre vers la mer.

- **Vents de montagne :** Les montagnes peuvent avoir un impact similaire, agissant également comme une barrière naturelle et influant sur les vents notamment via l'onde orographique[7]. Un vent ascensionnel le long du relief peut également avoir lieu sous l'effet de la circulation d'air causée par la différence de température entre les masses d'air réchauffées sur les versants ensoleillés des vallées et celles de la vallée elle-même (vent anabatique), l'inverse arrivant généralement la nuit (vent catabatique). Des vents chauds et secs descendant des versants lumineux des montagnes peuvent également apparaître après qu'ils ont déchargé leur humidité sur les versants opposés (effet de Foehn)[8].



7. L'onde orographique se produit lorsque le déplacement d'une masse d'air au-dessus d'un relief montagneux est forcé en altitude.
8. Plus d'explications disponibles sur http://www.espace-sciences.org/archives/science/13057-comment-ca-marche-f63a.html (consultation novembre 2014).

Les vents peuvent également varier en fonction uniquement de l'altitude. L'équation suivante est généralement utilisée pour calculer la vitesse des vents à différentes hauteurs :

$$(1)\ VzV_{10}=KZ\alpha$$

Où,

- V_z = vitesse du vent à altitude Z (m), en km/h ;
- V_{10} = vitesse du vent à altitude de 10 mètres (standard des stations météo), en km/h ; et
- K et α étant des coefficients variant en fonction du terrain (sans dimensions)[9].

Rugosité et végétation

Sur terrain plat et sans obstruction, la vitesse des vents varie en fonction de la rugosité, particulièrement celle dite « molle » (forêts, savanes), de sa surface et de sa hauteur : une rugosité plus importante a un effet ralentissant, tandis qu'une désertification a l'effet inverse. L'urbanisation agit également comme une obstruction superficielle dont il faudra tenir compte, notamment pour des stratégies de ventilation passive.

1.2.6 Rapide revue de l'impact des différents climats

Une bonne conception du bâtiment va donc devoir intégrer ces différents paramètres afin de limiter la consommation énergétique et de garantir la qualité de confort intérieur. À titre d'exemple, dans les milieux tropicaux équatoriaux où l'humidité et la chaleur sont importantes, on privilégiera une orientation Nord-Sud du bâtiment, une protection contre les radiations et une maximisation du potentiel de ventilation naturelle avec des matériaux légers. La stratégie sera différente dans les climats tropicaux chauds et secs où l'amplitude des températures journalières (nuits froides) est plus importante et une inertie plus élevée du bâtiment sera donc recommandée. Les prochaines sections de ce guide reprennent les principes des différentes stratégies à adopter (cf. chapitres 2 et 3).

1.3 Climat et confort : les diagrammes bioclimatiques

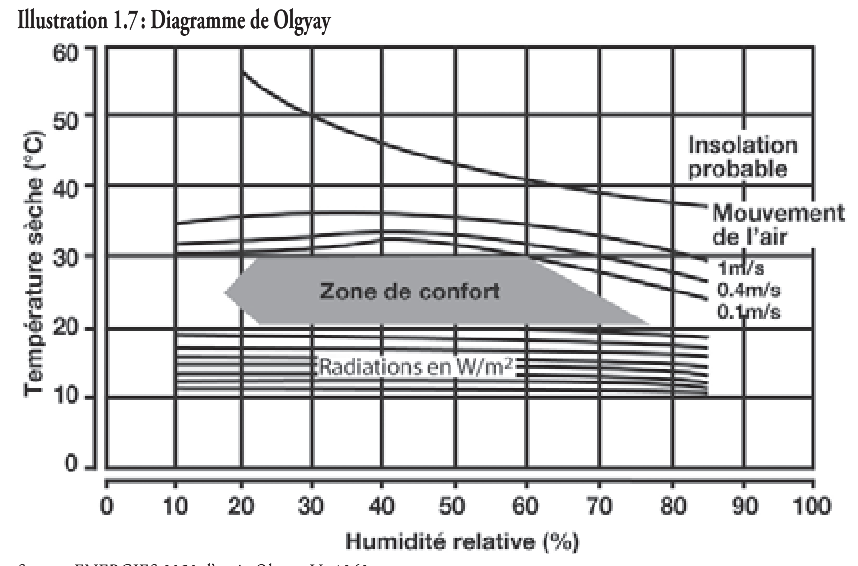
Les diagrammes bioclimatiques sont des outils d'analyse permettant de mieux définir les stratégies à adopter dans la conception du bâtiment, en fonction du climat local et du confort hygrothermique de ses occupants.

9. Pour plus de détails sur l'estimation de ces coefficients, visiter http://www.freelem.com/eurocode/eurocode1/vent.htm (consultation novembre 2014).

1.3.1 Diagramme de Olgyay

Dans les années 1950, un architecte hongrois, Victor Olgyay, constatant l'influence des conditions climatiques extérieures sur le confort d'un bâtiment, développa un outil d'aide à la décision appelé diagramme bioclimatique.

Illustration 1.7 : Diagramme de Olgyay



Source : ENERGIES 2050 d'après Olgyay, V., 1963.

Dans ce graphique sont mis en relation températures (axe des ordonnées) et taux d'humidité relative (abscisses). Au centre figure une zone de confort correspondant à des températures extérieures variant de 20 à 30°C et à des taux d'humidité extérieure situés entre 18 % et 75 %. Cela permet ainsi d'analyser graphiquement les conditions climatiques locales et de définir en conséquence la stratégie à privilégier dans la conception du bâtiment.

Il convient de souligner que la notion de confort reste cependant subjective et dépend non seulement de paramètres climatiques mais également de facteurs physiologiques et psychologiques (voir chapitre 2). La zone de confort peut ainsi se définir comme un ensemble de conditions climatiques intérieures dans lesquelles une majorité de personnes va pouvoir expérimenter un confort thermique[10]. D'autre part, en ne prenant en compte que des facteurs climatiques extérieurs, cet outil néglige certains paramètres physiologiques des espaces intérieurs et trouve donc essentiellement son application dans les climats chauds et humides[11], où les études montrent des variations climatiques plus modérées entre intérieur et extérieur[12].

10. Visitsak S., 2007, p. 42.

11. Sayigh, A. et A. H. Marafia, 1998.

12. Gallo C. et al., p. 10.

1.3.2 Diagramme de Givoni

En 1969, Baruch Givoni, un architecte israélien, publie un outil similaire qui établit une relation linéaire entre l'amplitude des températures intérieures (basées sur des standards ou des calculs thermiques) et l'humidité absolue.

Illustration 1.8 : Diagramme de Givoni

Source : ENERGIES 2050, d'après Université Sultan Qaboos, 2010, via N. Al-Azri et al., 2012.

Autour de la zone de confort thermique (CZ) sont définis quatre domaines de stratégies passives : ventilation naturelle (NV), inertie thermique (HM), inertie thermique et ventilation nocturne (HMV) et refroidissement par évaporation (EC).

L'utilisation de cet outil est basée sur deux relevés :

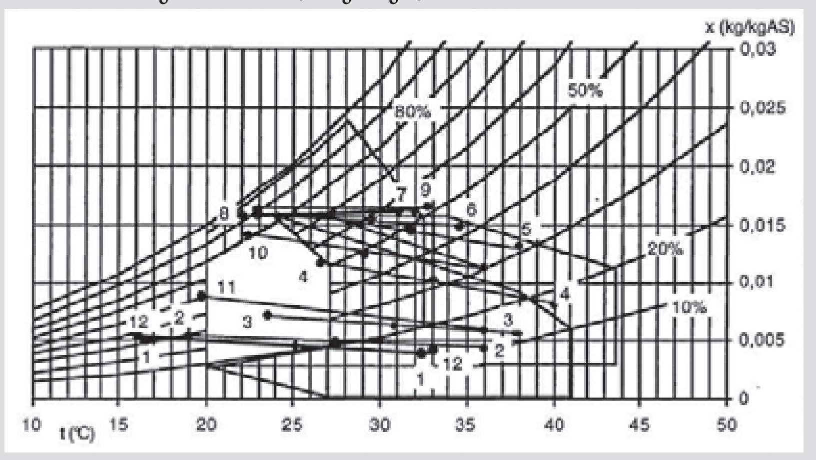
- la moyenne mensuelle des températures maximales journalières (abscisse) rapportée à celle des taux d'humidité absolue minimums journaliers (ordonnée), et, inversement,
- la moyenne des températures minimales journalières rapportée à celle des taux d'humidité absolue maximums.

En reliant ainsi les deux points obtenus, on obtient un tracé qui, en fonction de son positionnement par rapport aux cinq zones précitées, permet de définir des objectifs stratégiques sur le mois étudié.

Encadré 1.2 : Utilisation du diagramme de Givoni à Ouagadougou, Burkina Faso

Une illustration pratique du diagramme de Givoni peut être trouvée ci-dessous pour la ville de Ouagadougou au Burkina Faso. Chaque mois est ici représenté par un numéro correspondant à sa position dans le calendrier (exemple 1=janvier et 12=décembre).

Illustration 1.9 : Diagramme de Givoni, Ouagadougou, Burkina Faso



Source : Coulibaly Y. et al., 1998.

Plusieurs constats peuvent ainsi être établis :

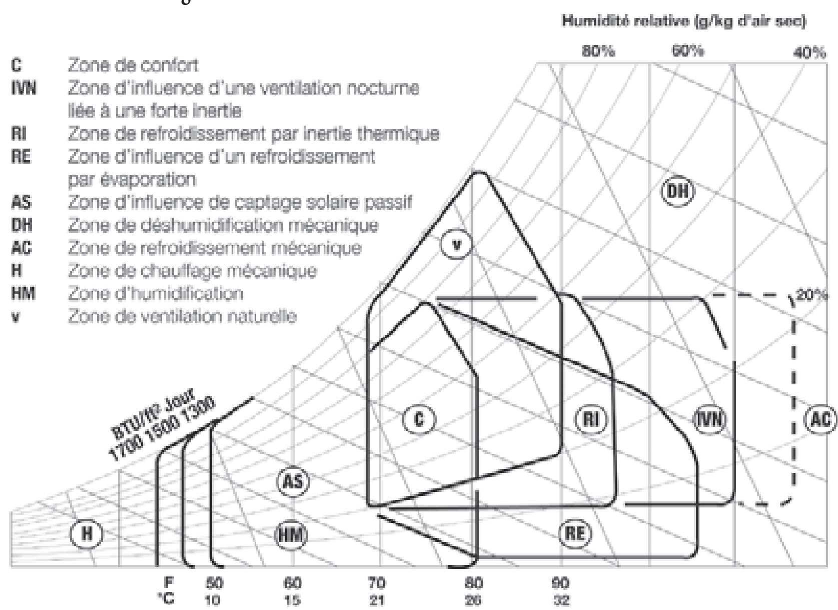
- Les mois de novembre (11) à mars (3) sont caractérisés par de fortes amplitudes de températures. Une inertie thermique assez élevée du bâtiment permettra un meilleur contrôle de l'ambiance intérieure ;
- Les températures sont en général au-delà de la zone de confort et doivent donc être compensées par un refroidissement naturel, ou dans les cas de fortes chaleurs (notamment pics en mars, avril, mai), par l'utilisation de systèmes d'air conditionné ;
- L'humidité n'est pas excessive et pourra être contrôlée si nécessaire via l'utilisation d'un système de ventilation naturelle pour la période allant de mai à octobre.

Source : Coulibaly Y. et al., 1998.

1.3.3 Diagramme de Givoni et Milne

Le diagramme bioclimatique le plus utilisé aujourd'hui reste cependant celui établi par Givoni et Milne en 1979. Celui-ci redéfinit les différentes stratégies et fait apparaître graphiquement l'humidité relative et la température humide. Les relevés climatiques à utiliser sont ici plus ponctuels et peuvent inclure des données horaires.

Illustration 1.10 : Diagramme de Givoni et Milne



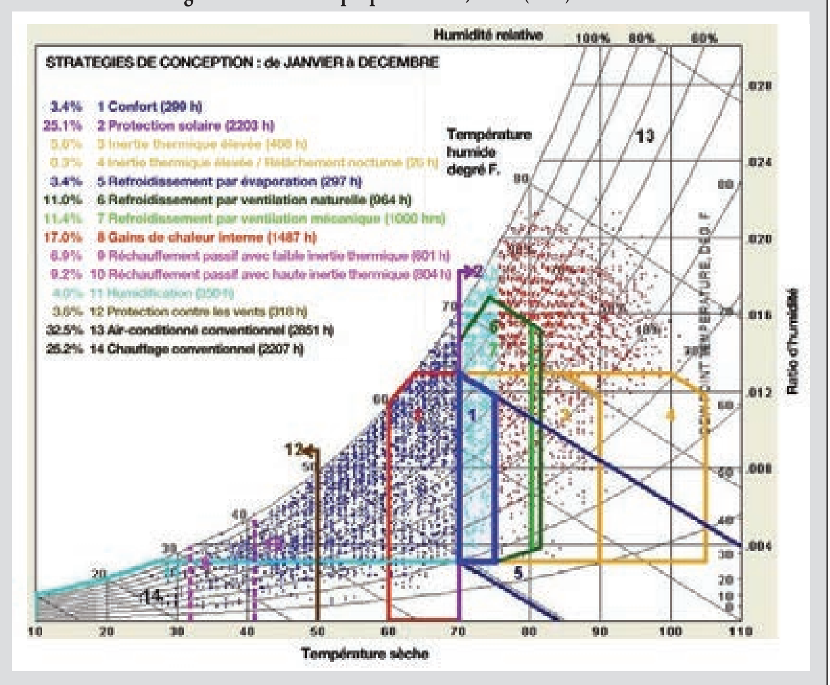
Source : ENERGIES 2050, d'après Milne M. et Givoni B., 1979.

Sur ce diagramme figurent ainsi plusieurs zones spécifiques notamment :

- Zone de confort ;
- Zone de ventilation naturelle ;
- Zone de refroidissement par évaporation ;
- Zone de refroidissement en utilisant l'inertie thermique ;
- Zone de refroidissement par air conditionné ;
- Zone d'humidification ;
- Zones de chauffage.

Encadré 1.3 : Utilisation du diagramme de Givoni et Milne

Illustration 1.11 : Diagramme bioclimatique pour Austin, Texas (USA)



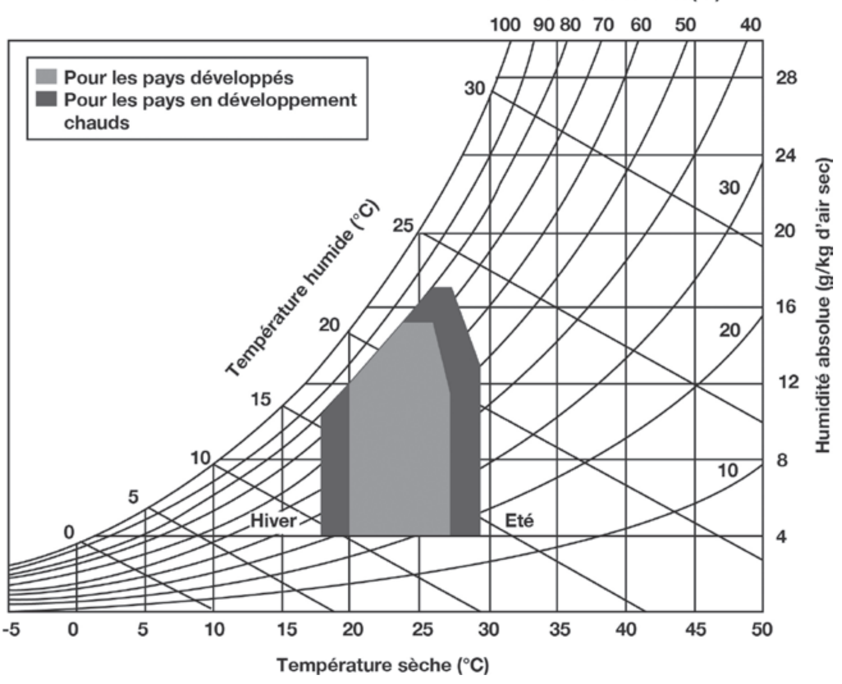
Source : ENERGIES 2050, d'après Lake|Flato Architects – Climate Consultant software, via site web de l'Institut Américain des Architectes (consultation du site novembre 2014).

Ici l'air conditionné et le chauffage artificiel seront nécessaires dans 32,5 et 25,2 % des cas, respectivement, pour maintenir les conditions de confort intérieur. Dû à une humidité relativement élevée lors des périodes chaudes, la ventilation naturelle sera préférable à une stratégie de refroidissement basée sur l'inertie thermique. La conception des bâtiments devra également intégrer des masques et protections solaires (25,1 % des cas).

1.3.4 Adaptation du diagramme bioclimatique aux climats chauds

Les recherches de Givoni l'ont par ailleurs conduit à élargir la zone de confort pour les pays en développement situés dans des climats chauds, où les populations s'acclimatent mieux à la chaleur et où une température plus élevée peut être compensée par une ventilation naturelle accrue[13]. Cet élargissement répond également à une contrainte énergétique plus élevée dans les pays en développement.

Illustration 1.12 : Adaptation de la zone de confort aux pays en développement situés en climats chauds



Source : ENERGIES 2050 d'après Givoni B., 1998.

Certains courants en architecture soutiennent finalement une extension du seuil de température d'inconfort à 30-32°C, afin d'accroître la marge pour la mise en place d'une stratégie bioclimatique passive[14].

13. La Roche P.M, 2011, p. 110, d'après Givoni B., 1998.

14. Solener, ADEME, 2014.

Références

Al-Azri N. et al., 2012. *Development of bioclimatic chart for passive building design in Muscat-Oman*, Département d'ingénierie mécanique et industrielle, Université Sultan Qaboos, Muscat, Oman, disponible via http://www.icrepq.com/icrepq'12/841-al-azri.pdf

Coulibaly Y., Thiombiano G., Traore M.Y., 1998. *Climat et confort thermique*, Sud sciences et technologies n° 2, disponible via http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/36319/sst6_22.pdf?sequence=1.

Descartes, 2009. *Consultation Internationale de recherche et de développement sur le grand pari de l'agglomération parisienne* – Le grand pari de l'agglomération parisienne, livret chantiers 1 et 2, fév. 2009.

Gallo C., Salo M. et Sayigh A.M.M., 1999. *Architecture, comfort and Energy*, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK.

Givoni B., 1998. *Climate Considerations in Building and Urban Design*, John Wiley and Sons.

Kottek M. et al., 2006. *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 15 n° 3, disponible via http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Paper_2006.pdf.

La Roche P.M., 2011. *Carbon neutral architectural design,* CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca-Raton, Florida, USA.

McMullan R., 2007. *Environmental Science in Building, sixth edition,* Palgrave Macmillan, London, UK.

Milne M. et Givoni B., 1979. *Energy Conservation through Building Design*, D. Watson (Ed.), New York, McGraw Hill, 96-113.

Olgyay, V., 1963. *Design with Climate, Bioclimatic Approach and Architectural Regionalism*, New Jersey : Princeton University Press.

Sayigh, A. et A. H. Marafia, 1998, *Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2 : 3-24.

Solener, ADEME, 2014. *Guide climatisation tertiaire en Guyane,* ADEME Guyane (version d'octobre 2013).

Visitsak S., 2007, *An evaluation of the bioclimatic chart for choosing design strategies for a thermostatically-controlled residence in selected climates*, *dissertation submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University as part of a doctorate of philosophy*, disponible via http://esl.tamu.edu/docs/publications/thesis_dissertations/ESL-TH-07-08-01.pdf.

Waugh D. et Thornes N., 2000. *Geography, an integrated approach.* Nelson Thomas, Cheltenham, Royaume-Uni.

Sites internet *(dernière consultation en novembre 2014)* et sources additionnelles des illustrations

BBC (British Broadcasting Corporation) **:** www.bbc.co.uk

Espace sciences : http://www.espace-sciences.org/archives/science/13057-comment-ca-marche-f63a.html

Freelem : http://www.freelem.com/eurocode/eurocode1/vent.htm

Gouvernement du New Jersey, US Geological Survey : http://nj.usgs.gov/grapher/tutorial/examples.html

Institut d'Architecture Avancée de Catalogne : http://www.iaacblog.com

SMF-Météo Climat : http://meteoetclimat.fr

Lake|Flato Architects – Climate Consultant software via site de l'Institut Américain des Architectes : http://www.aiatopten.org

Université de Californie, Los Angeles (UCLA) – Energy design tools : http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/papers/ASES09-Yasmin.pdf

Wiki.naturalfrequency.com : http://wiki.naturalfrequency.com

Chapitre 2
Stratégies passives dans le bâtiment, bases et concepts

L'objectif d'une conception passive est d'exploiter différents gisements naturels disponibles afin d'obtenir un meilleur confort pour les occupants du bâtiment tout en réduisant les besoins énergétiques futurs. La sobriété énergétique constitue donc ici la priorité, devant l'efficacité énergétique et l'adoption d'énergies renouvelables[1].

Dans un environnement tropical où les températures et l'humidité sont élevées, cette stratégie devra s'articuler autour de plusieurs piliers, dont les principaux sont :

- Limiter les apports de chaleur ;
- Favoriser la ventilation naturelle ;
- Exploiter les possibilités d'utilisation de l'éclairage naturel ;
- Respecter les limites de confort interne du bâtiment.

Dans les climats tropicaux secs, la ventilation naturelle sera limitée ou utilisée en combinaison avec une inertie thermique plus élevée ainsi que des techniques de refroidissement par évaporation.

L'une des difficultés principales réside cependant dans l'équilibrage des différentes influences du climat sur le confort thermique et visuel du bâtiment, résumées par le tableau ci-après.

2.1 Notions de confort des occupants

Le confort des occupants peut être divisé en quatre sections : confort hygrométrique, olfactif (qualité et vitesse de circulation de l'air), visuel et acoustique.

2.1.1 Notions de confort hygrothermique

Le confort hygrothermique peut être défini comme un état d'équilibre dans lequel un individu se satisfait de l'environnement thermique qui l'entoure, avec une température du corps maintenue autour de 37°C. Cet état d'équilibre dynamique dépendra des échanges thermiques entre le corps et son environnement, notamment conditionnés par :

- le métabolisme et la production de chaleur du corps humain (fonction également de l'activité), qui se fera par rayonnement, convection, conduction et transpiration ;

1. Site www.negawatt.org (consultation novembre 2014)

Tableau 2.1 : Avantages et désavantages des influences climatiques sur le bâtiment en milieu tropical

- l'habillement de l'individu ;
- la température ambiante de l'air ;
- la température des parois ;
- l'humidité relative de l'air ; et
- la vitesse de l'air qui influence les échanges thermiques par convection.[2]

Paramètre climatique	Avantages potentiels	Inconvénients potentiels
Rayonnements solaires – confort visuel	Potentiel pour éclairage naturel	Luminosité trop importante/ risque d'éblouissement
Radiations solaires – confort thermique	Apport de chaleur si nécessaire, énergies renouvelables	Apport de chaleur excessif
Températures de l'air	Réduction des besoins en stratégie passive si proches des températures de la zone de confort	Températures excessives : peuvent résulter en un besoin élevé en air conditionné
Vents	Utilisation pour ventilation et refroidissement passifs	Transferts thermiques et vitesse de circulation de l'air excessive, variations naturelles difficiles à anticiper
Humidité		Nécessite une plus grande utilisation de la ventilation et du refroidissement passifs ou actifs si élevée
Précipitation	Provision d'eau pour végétation ou toits verts	Écoulement des eaux à considérer dans la conception

Encadré 2.1 : Adaptation et confort hygrométrique

À ambiance intérieure égale, un meilleur confort hygrométrique peut être obtenu via :

- une adaptation des activités (par exemple horaires de travail ou activités physiques) aux contraintes du climat ;
- une adaptation des tenues vestimentaires (vêtements chauds en ambiance froide et inversement) ;
- l'adaptation physiologique (mécanismes d'autorégulation du corps) des occupants.

2. Gratia E., Université catholique de Louvain (consultation du site novembre 2014).

Comme évoqué dans le chapitre précédent (cf. Partie 1.3 – Climat et confort) une des réponses apportées à cette problématique est la définition d'une zone de confort qui satisfait une majorité d'occupants : les travaux de Givoni et Milne[3] proposent ainsi, pour les régions tropicales, des températures variant de 20 à 28°C et une humidité relative comprise entre 20 et 80 %. Afin d'atteindre cette cible, une bonne conception du bâtiment visera notamment à limiter les apports de chaleur et d'humidité en climat tropical humide, et les apports thermiques et fluctuations de températures trop importantes en climat tropical sec.

Il est également possible d'utiliser, en complément à ces diagrammes, le modèle de Fanger (modèle statique). Ce modèle établit une relation entre la valeur moyenne prédite (PMV : Predicted Mean Vote) de perception thermique de l'ambiance, jugée par un groupe de personnes sur une échelle allant de –3 (très froid) à +3 (très chaud), 0 étant la valeur neutre, et le pourcentage de personnes qui ne seront pas satisfaites (PPD : Percentage Predicted of Dissatisfied)[4] par cette ambiance d'un point de vue du confort.

Illustration 2.1 : Relation entre PPD et PMV

Source : http://www.deparisnet.be/ (consultation novembre 2014).

2.1.2 Confort olfactif et renouvellement d'air

Au-delà des températures et de l'humidité, un autre facteur pouvant affecter la sensation de confort est la vitesse de circulation de l'air, qui agit notamment sur la régulation des flux de chaleur entre le corps et le milieu ambiant. Un individu commence à

3. Disponible notamment via GRET, 1986.

4. Pour plus de détails sur les équations du modèle, voir notamment Fanger P.O. 1967.

ressentir cette circulation d'air à partir de 0,2m/s (mètre par seconde) et est en inconfort absolu pour des valeurs supérieures à 5m/s. La vitesse préconisée du point de vue du confort est autour de 1,5m/s.[5]

Le renouvellement de l'air intérieur permet notamment de maintenir sa qualité et d'extraire les polluants tels que les odeurs, les micro-organismes ou la vapeur d'eau. Il est, par exemple, recommandé de maintenir un taux d'oxygène à 20,7 % et un taux de gaz carbonique à 0,03 % dans l'air[6]. Une moyenne de renouvellement équivalente à 15 ou 25m^3 par heure et par personne est généralement appliquée, mais les normes peuvent varier selon les situations et en fonction des impératifs d'économies d'énergie[7]. À la Réunion, la réglementation sur la qualité de l'air intérieur impose par exemple un renouvellement équivalent à 15 ou 18m^3 par personne et par heure pour des salles de classe et des bibliothèques[8]. Le tableau suivant donne des données supplémentaires sur les renouvellements d'air préconisés en fonction des usages en milieu tropical africain[9] :

Tableau 2.2 : Taux de renouvellement d'air selon le taux d'occupation et l'utilisation du bâtiment pour pays tropicaux africains

Locaux	Débit [m^3/h par personne]	Taux d'occupation [m^2 par personne]	Débit [m^3/h par m^2]
Salle de cours	15	1,5	10
Salle d'attente non-fumeur	18	3	6
Salle d'attente fumeur	25	3	8,5
Bureaux	25		
Bibliothèque	25	12,5	2
Salle de réunion	18	1,5	12

2.1.3 Confort visuel et éclairage naturel

Différents facteurs déterminent la qualité de la lumière d'un point de vue du confort : la distribution de la luminance, l'intensité de lumière, le facteur de lumière du jour, le niveau de dépendance à l'éclairage naturel, l'éblouissement et enfin la couleur de la source lumineuse et son rendu.

5. IEPF, 2006, p. 144.
6. IEPF, 2006, p. 144.
7. Abaisser les taux de renouvellement d'air nuit en partie au confort des occupants mais peut permettre de réaliser des économies substantielles, particulièrement en bâtiment sous ventilation mécanique.
8. DAHS, 2012, p. 2.
9. IEPF, 2006, p. 18.

Distribution de la luminance

La luminance peut-être définie comme une mesure de la capacité d'une source lumineuse à éclairer, rapportée à la surface observable de cette source[10]. Cette unité, mesurée en candela par mètre carré (cd/m²), peut donc être mesurée par le flux lumineux réfléchi rapporté à l'aire de la surface réfléchissante.

À titre indicatif, la luminance du soleil est de 2,3 milliards cd/m² et celle d'une lampe fluorescente de 6 000 à 8 000 cd/m². La lumière réfléchie par une surface dépendra du type de surface mais également de l'éclairement lumineux, qui est la densité de flux lumineux atteignant cette surface en Lux (lx), avec 1 lux=1lumen/m². Le lumen est l'unité physique (système impérial) de mesure du système lumineux. Nous reviendrons sur ces différents points dans la partie éclairage de ce guide (cf. Chapitre 4).

Illustration 2.2 : Luminance

Source : ENERGIES 2050, d'après www.enablingenvironments.com.au (consultation novembre 2014).

La distribution de la luminance dans une pièce sera un facteur essentiel du confort visuel de l'occupant. En effet, lorsque deux surfaces à luminances très différentes sont concentrées dans son champ de vision central, l'œil connaît des difficultés à s'ajuster, ce qui peut entraîner notamment des sensations de fatigue. Des valeurs de ratios de luminances (valeurs minimales/maximales) autour de 1 sur 3 dans l'ergorama (champ de vision direct), de 1 sur 10 dans le panorama, et de 1 sur 40 dans l'ensemble du local sont ainsi considérées comme des maximums acceptables, selon une étude menée en Belgique[11].

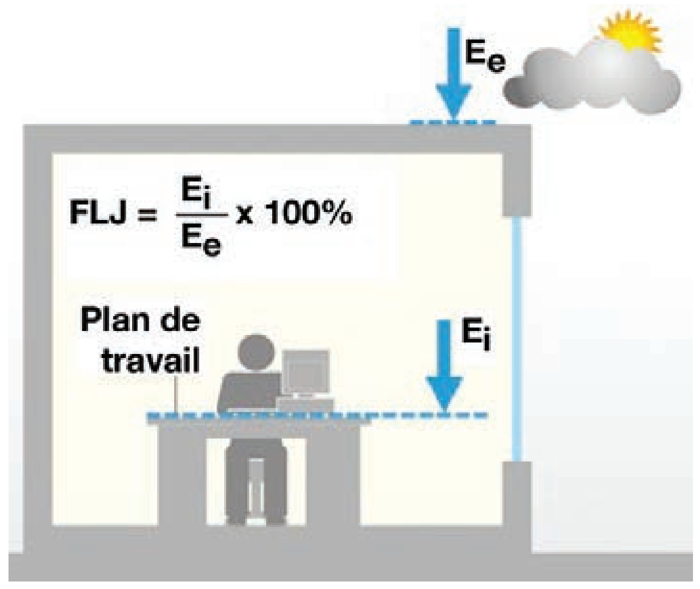
10. McMullan, 2007, p. 111.

11. Bodart M., Deneyer A. (sans date).

Facteur de lumière du jour

Le facteur de lumière du jour (FLJ) est le rapport entre la lumière reçue (lux) en un point donné à l'intérieur du bâtiment et l'éclaircissement extérieur simultané sur une surface horizontale par ciel couvert et en site dégagé, exprimé en pourcentage (voir illustration 2.3).

Illustration 2.3 : Facteur de lumière du jour



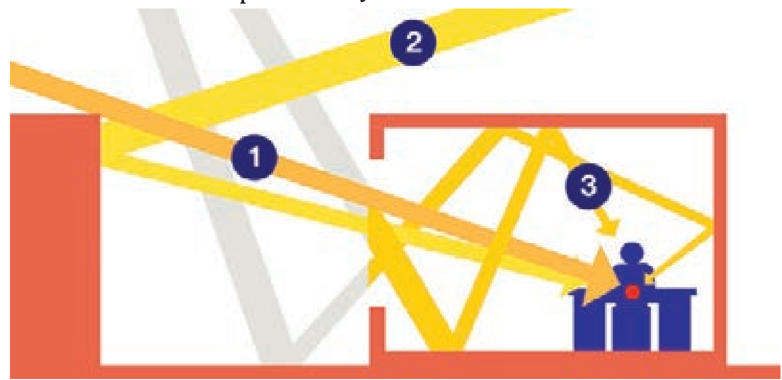
Source : Université Catholique de Louvain, Site Energie + (consultation du site novembre 2014).

Dans ces conditions de ciel couvert[12], le FLJ est une mesure de la qualité du bâtiment à capter la lumière naturelle (pourcentage de la lumière extérieure entrant dans le bâtiment), indépendamment de l'orientation des ouvertures ou de la saison (voir illustration 2.4). Le calcul du FLJ à un point donné passe par l'évaluation de trois composantes :

- La composante du ciel (1 dans l'illustration) – éclairement provenant du point du ciel considéré.
- La composante réfléchie extérieure (2) – éclairement réfléchi par les surfaces extérieures, par exemple les bâtiments.
- La composante réfléchie intérieure (3) – éclairement réfléchi par les objets et surfaces intérieurs.

12. Les conditions de ciel couvert (ou nuageux) permettent de faire abstraction du rayonnement direct du soleil.


Illustration 2.4 : Différentes composantes du FLJ



Source : Gratia E., Université catholique de Louvain (consultation du site novembre 2014), illustration redessinée par ENERGIES 2050.

D'après cette définition, on peut ainsi remarquer que le FLJ à un point donné sera dépendant en partie des coefficients de réflexion des surfaces internes et des coefficients de transmission de la lumière des vitres et des ouvertures des parois.

Tableau 2.3 : Valeurs typiques du FLJ

FLJ	**< 1 %**	**1 à 2 %**	**2 à 4 %**	**4 à 7 %**	**7 à 12 %**	**> 12 %**
	Très faible	**Faible**	**Modéré**	**Moyen**	**Élevé**	**Très élevé**
Zone considérée	Zone éloignée des fenêtres (distance environ de 3 à 4 fois la hauteur de la fenêtre)			À proximité des fenêtres ou sous des lanterneaux		
Impression de clarté	Sombre à peu éclairé		Peu éclairé à clair		Clair à très clair	
Impression visuelle du local	Cette zone … semble être séparée … de cette zone					
Ambiance	Le local semble être refermé sur lui-même			Le local s'ouvre vers l'extérieur		

Source : Université Catholique de Louvain, Site Energie + (consultation novembre 2014).

Facteur de lumière du jour moyen

Le facteur de lumière du jour moyen peut être utilisé dans l'analyse du confort visuel interne d'un bâtiment. Il correspond à la moyenne des valeurs des FLJ mesurées au niveau de l'espace de travail dans l'ensemble de la pièce ou des espaces concernés. Le FLJ moyen peut également être estimé par[13] :

$$(1)\ FLJ_{moy} = Sf \times TL \times a \,/\, (St \times (1 - R \times R))$$

Où,

- Sf = surface nette de vitrage (ouverture de baies moins 10 % pour les châssis) [m²] ;

13. Université Catholique de Louvain, Site Energie + (consultation novembre 2014).



- TL = facteur de transmission lumineuse du vitrage, dont on déduit 10 % pour tenir compte des saletés ;
- a = angle du ciel visible depuis la fenêtre [°] ;
- St = surface totale de toutes les parois du local considéré [m^2] ;
- R = facteur de réflexion moyen des parois.

Nous reviendrons plus en détail sur les valeurs recommandées des FLJ et FLJ moyens dans le chapitre 4.

Facteur d'autonomie en lumière du jour

Un autre indicateur pouvant être utile dans l'évaluation d'une stratégie d'éclairage est le facteur d'autonomie en lumière du jour. Il est défini comme le pourcentage des heures occupées (généralement de 8h à 18h) par an où le niveau d'éclairement minimum requis peut être assuré par la seule lumière naturelle. Des valeurs de 50 à 60 % sont généralement recommandées mais des stratégies passives pourront chercher à accroître ces taux aux alentours des 80 %[14].

Un des avantages à l'utilisation de cet indice est qu'il prend non seulement en compte les conditions d'éclairement extérieur du site mais également l'occupation de l'espace étudié (valeurs minimales) et son orientation[15].

Éblouissement

L'éblouissement peut être défini comme la sensation entraînée par l'observation de surfaces, dans un même champ de vision, ayant soit une luminosité trop intense soit un contraste lumineux trop important entre elles. Cela peut entraîner une réduction de l'aptitude à percevoir les objets et, dans certains cas, un aveuglement temporaire.[16] L'éblouissement en éclairage naturel peut notamment être provoqué par :

- Une vision directe du ciel ou du soleil (au travers de parois transparentes) ;
- La réflexion du soleil et du ciel sur les bâtiments voisins, en particulier si ceux-ci utilisent des surfaces à forts coefficients de réflexion ;
- Un contraste de luminance trop élevé entre une fenêtre et le mur dans lequel elle s'inscrit, entre une fenêtre et son châssis ou encore entre une surface et les surfaces voisines.

L'éblouissement peut ainsi se produire en fonction de l'éclaircissement direct ou indirect. Tous ces éléments doivent être pris en considération dans la mise en place d'une stratégie d'éclairage passif, comme nous le verrons dans le chapitre 4.

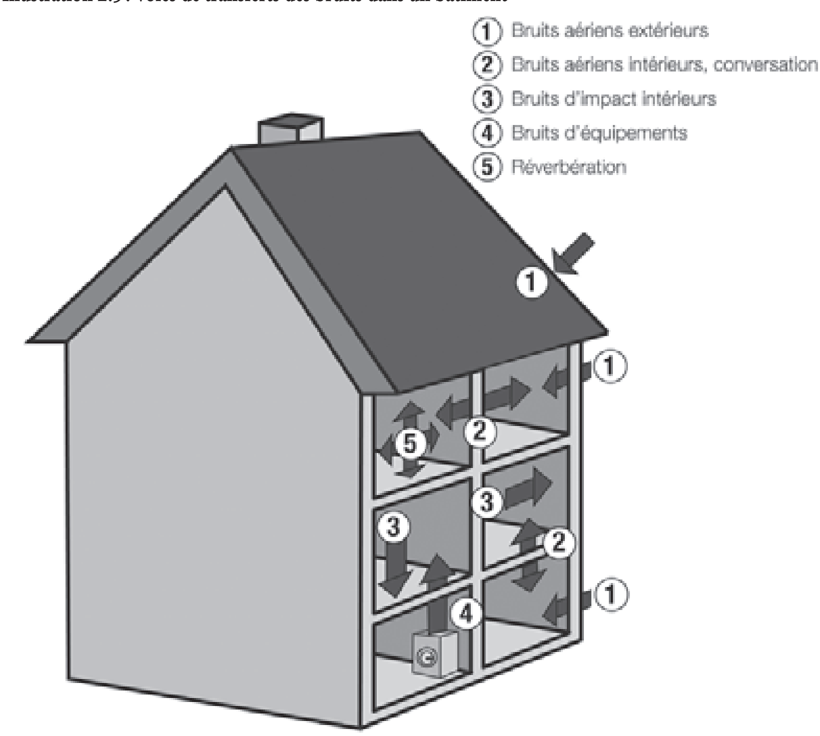
14. Solener, 2014.
15. Université Catholique de Louvain, Site Energie + (consultation novembre 2014).
16. Université Catholique de Louvain, Site Energie + (consultation novembre 2014).

2.1.4 Confort acoustique

Un autre élément à prendre en considération dans la mise en place de stratégies passives est le confort acoustique des occupants. Offrir une ambiance sonore de qualité dépendra notamment d'une bonne protection contre les bruits extérieurs, un objectif qui peut rendre les stratégies de ventilation naturelle plus complexes comme nous le verrons dans le chapitre qui suit (chapitre 3).

Il convient ainsi de respecter certaines normes concernant la réverbération des locaux, l'isolement du bruit entre les espaces intérieurs, l'isolation de l'enveloppe extérieure et la maîtrise des bruits des équipements techniques.

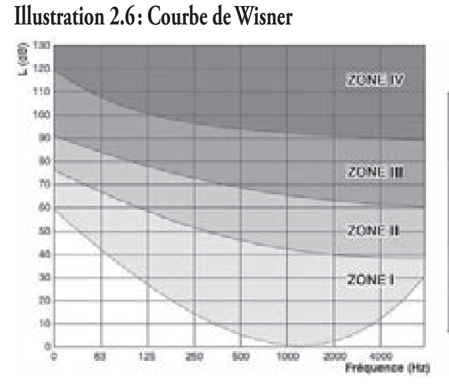
Illustration 2.5 : Voies de transferts des bruits dans un bâtiment



Source : ENERGIES 2050, d'après http://www.infociments.fr/telecharger/CT-B41 (consultation novembre 2014).

Les maximums acceptables en termes de bruit dépendront en grande partie de la réglementation locale et de l'utilisation des locaux. L'illustration ci-dessous donne cependant certaines indications sur les valeurs à ne pas excéder en matière de décibels et de fréquence en fonction du type d'occupation.

Illustration 2.6: Courbe de Wisner



Zone IV	Le travail intellectuel complexe n'est pas gêné de façon appréciable
Zone III	Le travail intellectuel complexe est pénible, mais le travail courant administratif ou commercial n'est pas gêné de façon nette.
Zone II	Le travail intellectuel est pénible et le travail administratif est difficile
Zone I	Une exposition prolongée provoque la surdité professionnelle.

Source: IEPF, 2006, p. 58.

Quelques règles de base concernant l'isolation auditive:

- Les matériaux plus légers offrent en règle générale une plus faible protection;
- Les doubles vitrages réduisent les transferts de son depuis l'extérieur;
- Les murs de séparations internes jouent un rôle important dans la qualité sonore des locaux;
- La prise en compte de l'environnement extérieur peut permettre de limiter l'exposition du bâtiment aux bruits, et d'utiliser à bon escient des protections naturelles telles que la végétation et la topographie. Cela nécessitera également une bonne identification des principales sources de pollutions sonores extérieures (par exemple routes ou transports).

Encadré 2.2: Intégration des différents paramètres de confort

L'intégration des différents paramètres de confort dans la conception du bâtiment est un exercice difficile, une difficulté notamment liée aux influences parfois contradictoires du climat évoquées plus haut dans ce chapitre (tableau 2.1). Ainsi:

Le renouvellement d'air est nécessaire au confort olfactif et peut servir à réduire les apports thermiques via la ventilation naturelle du bâtiment, mais une entrée d'air trop importante peut entraîner des courants d'air et également des apports de chaleur, en fonction de la température extérieure de l'air;

Les objectifs de confort acoustique sont susceptibles de limiter les possibilités de ventilation naturelle et influent donc sur les stratégies mises en œuvre pour assurer le confort thermique;

L'utilisation de la lumière naturelle s'accompagne généralement d'absorption de radiations solaires et peut donc impacter le confort thermique des occupants.

Tableau 2.4 : Niveau de bruit recommandé dans les locaux

TYPE DE BÂTIMENT	TYPE DE LOCAL	dB(A)
GARDERIES	Écoles maternelles	30 / 40 / 45
	Crèches	30 / 40 / 45
BÂTIMENTS PUBLICS	Auditoriums	30 / 33 / 35
	Bibliothèques	30 / 33 / 35
	Cinémas	30 / 35 / 40
	Salles d'audience de tribunal	30 / 35 / 40
COMMERCES	Magasins de détail	35 / 40 / 50
	Grands magasins	40 / 45 / 50
	Supermarchés	40 / 45 / 50
	Salles informatiques, grandes	40 / 50 / 60
	Salles informatiques, petites	40 / 45 / 50
HÔPITAUX	Couloirs	35 / 40 / 45
	Blocs opératoires	35 / 40 / 45
	Salles	25 / 30 / 35
HÔTELS	Couloirs	35 / 40 / 45
	Salons de réception	35 / 40 / 45
	Chambres d'hôtel (durant la nuit)	25 / 30 / 35
	Chambres d'hôtel (durant le jour)	30 / 35 / 40
BUREAUX	Petits bureaux	30 / 35 / 40
	Salles de réunions	30 / 35 / 40
	Bureaux paysagers	35 / 40 / 45
	Box à usage de bureaux	35 / 40 / 45
RESTAURATION	Cafétérias	35 / 40 / 50
	Restaurants	35 / 45 / 50
	Cuisines	40 / 55 / 60
ENSEIGNEMENT	Salles de cours	30 / 35 / 40
	Couloirs	40 / 45 / 50
	Salles de sport	35 / 40 / 45
	Salles des enseignants	33 / 35 / 40
BÂTIMENTS SPORTIFS	Stades couverts	35 / 45 / 50
	Piscines	40 / 45 / 50
TOUS TYPES	Toilettes	40 / 45 / 50
	Vestiaires	40 / 45 / 50

Source : IEPF, 2006.

2.2 Premières étapes d'une stratégie passive : choix du site et orientation

2.2.1 Sélection du site

Étape importante du processus de conception, la sélection du site doit notamment tenir compte de l'influence du climat local et en particulier (nous reviendrons sur le processus de sélection du site dans le cadre particulier de la ventilation et de l'éclairage naturels, chapitres 3 et 4) :

- de l'exposition du bâtiment aux vents, à l'humidité et aux radiations solaires ;
- de l'environnement immédiat (topographie, végétation, proximité de la mer, etc.) ;
- de l'utilisation faite du territoire autour du site (urbanisation par exemple).

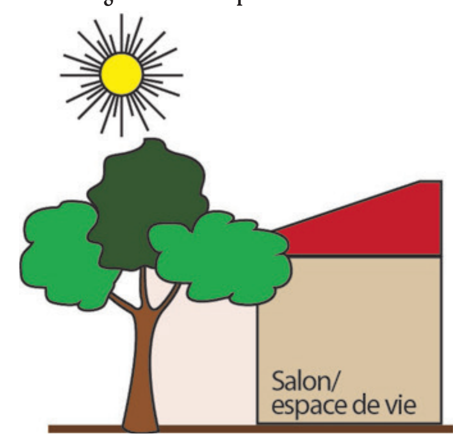
L'illustration suivante montre certaines des interactions du bâtiment avec son environnement.

Illustration 2.7 : Interactions d'un bâtiment avec son environnement immédiat

Source : http://www.cnrm.meteo.fr (consultation novembre 2014), illustration redessinée et adaptée par ENERGIES 2050.

La présence d'infrastructures urbaines peut permettre une protection plus élevée contre les radiations solaires (effet masque), mais rendra également les stratégies passives d'éclairage et de ventilation plus complexes. Lorsque cela est possible, la végétation peut alors être une bonne alternative, agissant non seulement en absorbant la chaleur mais également en offrant une barrière naturelle aux vents, et ce, sans forcément bloquer la circulation de l'air, comme le montre l'illustration ci-après.

Illustration 2.8 : Utilisation de la végétation comme protection naturelle

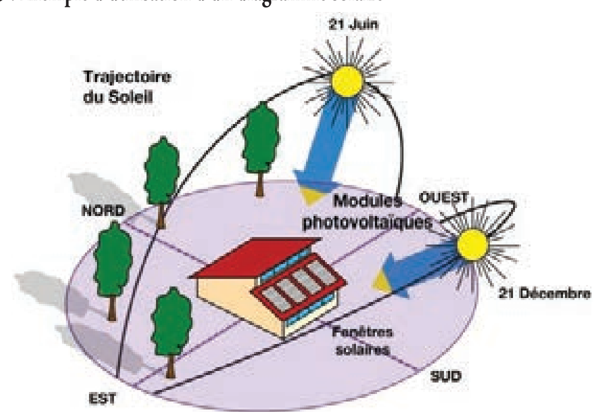


Source : ENERGIES 2050, d'après https://yourhome.infoservices.com.au/ (consultation novembre 2014).

2.2.2 Orientation du bâtiment

Une fois la sélection du site effectuée, la seconde étape consiste à étudier l'orientation optimale du bâtiment. Celle-ci aura pour but de limiter l'exposition de l'enveloppe aux radiations solaires tout en maximisant le potentiel pour un éclairage et une ventilation naturels. L'utilisation de diagrammes solaires, en combinaison avec une analyse approfondie des différents obstacles (topographie, végétation, urbanisation) est généralement recommandée. Les diagrammes solaires permettent, en effet, d'examiner la trajectoire du soleil par rapport à la localisation du site, et donc d'étudier son interaction avec les différentes parties du bâtiment.

Illustration 2.9 : Exemple d'utilisation d'un diagramme solaire



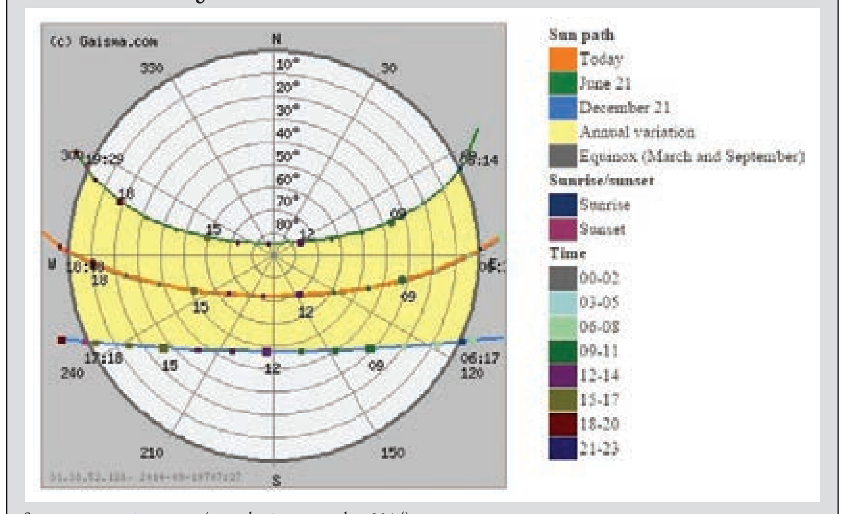
Source : ENERGIES 2050, d'après http://greenpassivesolar.com (consultation novembre 2014).

Les régions proches de l'Équateur présentent l'avantage d'expérimenter des variations modérées tout au long de l'année, tant en termes de trajectoires que d'activités solaires. Cela permet de faciliter l'intégration des effets du soleil dans la conception du bâtiment.



Encadré 2.3 : Intégration simplifiée des paramètres climatiques dans l'orientation du bâtiment, exemple de Port-au-Prince, Haïti

Illustration 2.10 : Diagramme solaire à Port-au-Prince, Haïti



Source : www.gaisma.com (consultation novembre 2014).

Les façades Est et Ouest, les toits ainsi que la façade Sud en hiver seront ici les plus exposés aux radiations solaires. Les températures moyennes restant élevées (23 à 25°C) tout au long de l'année, une orientation du bâtiment Nord-Sud avec une inclinaison légère vers l'Ouest ou l'Est, afin d'éviter l'entrée directe des radiations solaires en milieu de journée en hiver, sera préférable.

Compte tenu de l'humidité élevée à Port-au-Prince, l'orientation du bâtiment doit aussi tenir compte de son exposition aux vents afin de faciliter la mise en œuvre d'une ventilation passive (voir chapitre 3). Il est conseillé d'utiliser dans ce cadre les roses des vents, combinées à une étude des différents obstacles à la circulation de l'air.

Illustration 2.11 : Roses des vitesses moyennes et des fréquences, Haïti



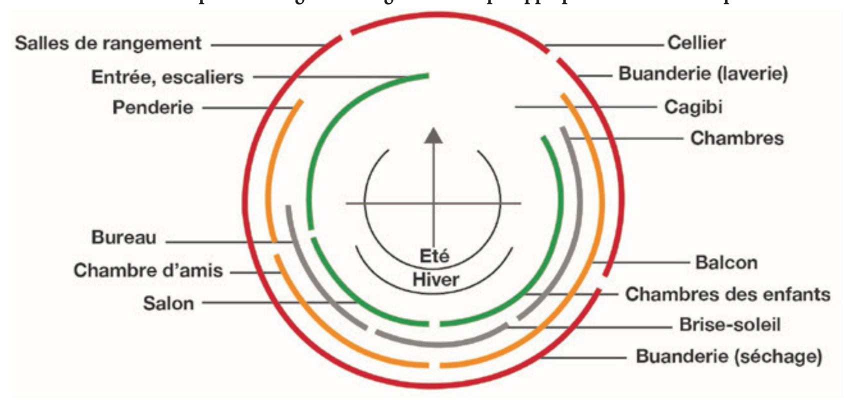
Source : 3E, 2010.

Dans cet exemple, on pourra ainsi optimiser l'intégration des paramètres climatiques avec une orientation du bâtiment Nord/Nord-Ouest à Sud/Sud-Est.

2.2.3 Placement des espaces internes

Chaque façade du bâtiment aura une exposition différente aux éléments tels que les radiations solaires et les vents. Une bonne orientation peut en conséquence s'accompagner d'une stratégie de zonage, qui consiste à placer les différentes pièces du bâtiment en fonction de cette exposition, de l'usage et du taux d'occupation prévisionnels des espaces intérieurs.

Illustration 2.12 : Exemple de stratégie de zonage concentrique appliquée à un climat tempéré



Source : ENERGIES 2050, d'après Université De Montfort, 2011.

Les zones les moins exposées aux apports de chaleur ou les plus aérées sont ainsi réservées à des utilisations demandant des températures modérées (chambres, salles de travail, etc.). À l'inverse, des locaux pouvant supporter des températures plus élevées, par exemple ceux dédiés au séchage ou au lavage de linge, pourront être placés du côté le plus exposé aux radiations solaires. Cette stratégie peut également permettre de regrouper les locaux en fonction de leurs besoins en air conditionné et de réduire ainsi le niveau de la facture énergétique, tout en adaptant au mieux le confort d'une pièce à l'utilisation qui en est faite.

2.3 Forme du bâtiment

Le choix de la forme du bâtiment aura un impact important sur sa future consommation énergétique, son exposition aux éléments climatiques mais également sur le potentiel pour l'installation d'énergies renouvelables décentralisées de type photovoltaïque ou panneaux solaires.

2.3.1 Compacité

Le ratio de la surface du bâtiment comparée à son volume, en m^2/m^3, est notamment une donnée importante. À volume constant, les transferts thermiques entre le bâtiment et l'extérieur, qui en milieu tropical seront souvent caractérisés par un transfert de la chaleur extérieure vers les espaces intérieurs, vont s'accroître à mesure que la forme du bâtiment devient moins compacte. Une plus grande surface amène en effet une plus grande exposition aux radiations solaires, comme illustré ci-dessous.

Encadré 2.4 : Note sur la thermie du bâtiment

L'impact des radiations solaires et températures extérieures sur le confort thermique interne du bâtiment peut être principalement résumé en deux équations[a] :

$$(2)\ Q_M = \alpha \,.\, F \,.\, S \,.\, R_M$$

Où,

- Q_M = Apports de chaleur par radiations, en W ;
- α = coefficient d'absorption de la paroi recevant le rayonnement (fonction de la couleur et nature du mur) ;
- S = surface de la paroi, en m^2 ;
- F = facteur de rayonnement solaire (part absorbée par la surface et transmise vers l'intérieur du local) ;
- R_M = rayonnement solaire incident sur la surface du mur, en W/m^2 (données météorologiques), qui dépend :
  – De la latitude sous laquelle le local se trouve ;
  – De l'orientation du mur ;
  – De l'heure à laquelle le calcul sera effectué.

Et,

$$(3)\ Q_R = k \,.\, S \,.\, \Delta\theta$$

Où

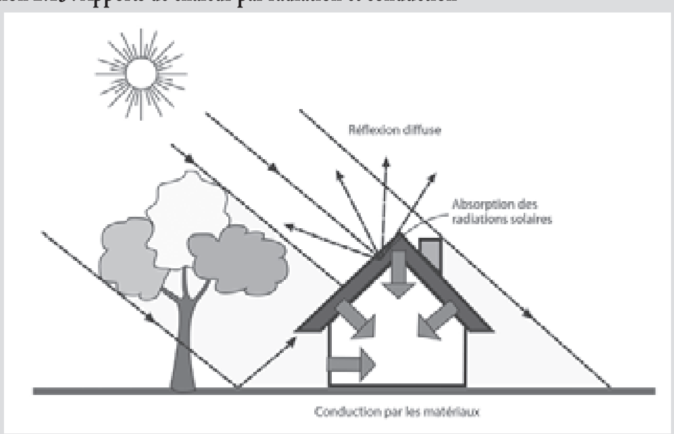
- Q_R = Apport de chaleur par conduction et convection, en W ;

a. IEPF, 2006.

- k = coefficient de transmission thermique de la paroi ou du vitrage considéré [W/m²K];
- S = surface de la paroi ou de la fenêtre considérée [m²];
- $\Delta\theta$ = différence de température entre les deux faces (extérieure/intérieure) de la paroi considérée [K], aux heures les plus chaudes.

La première équation (1) (voir section 2.1.3) résume l'interaction de la structure du bâtiment avec les radiations solaires. Celles-ci sont absorbées, transférées vers les espaces internes (apports de chaleur) ou réfléchies dans des proportions qui dépendent des caractéristiques des parois extérieures du bâtiment. À titre d'exemple, des matériaux plus clairs auront une capacité supérieure à réfléchir les radiations, tandis que des parois transparentes auront généralement une conductivité assez haute avec une transmission élevée de chaleur.

Illustration 2.13 : Apports de chaleur par radiation et conduction



Source : ENERGIES 2050, d'après Baker N., 1987.

La seconde équation (2) résume les flux thermiques entre un bâtiment et l'espace extérieur (convection et conduction), qui dépendront une nouvelle fois de la structure de l'enveloppe (particulièrement de la conductivité thermique) et des différences entre les températures extérieures et intérieures.

Ces deux équations ont par ailleurs plusieurs implications en termes de confort en milieu tropical, notamment :

- les transferts thermiques pourront être limités en réduisant la surface S du bâtiment ;
- le choix des matériaux composant les parois extérieures (toits, fenêtres, planchers et murs) aura un impact critique en termes de confort interne et de future consommation énergétique.

Illustration 2.14 : Deux types de bâtiments, à volume égal

Source : ENERGIES 2050, d'après http://anthro.palomar.edu/adapt/adapt_2.htm (consultation novembre 2014).

La réduction du ratio surface/volume peut ainsi permettre de réduire les transferts thermiques, mais également de limiter les matériaux nécessaires à la construction avec des conséquences en termes de coûts et d'énergie grise (comprend par exemple l'énergie nécessaire à la production des matériaux de construction et à leur transport sur le site).

Un compromis devra cependant être trouvé avec les objectifs de ventilation et d'éclairage naturels, qui sont eux favorisés par une forme longue et étroite du bâtiment. Une distance accrue entre les façades peut en effet impacter négativement la circulation d'air tandis qu'une structure plus compacte réduira l'entrée de lumière dans certaines pièces.

Dans un climat chaud et humide, il sera par exemple conseillé d'opter pour une structure moins compacte favorisant la ventilation naturelle du site, combinée à une protection efficace de l'enveloppe du bâtiment contre les apports de chaleur notamment sur ses façades Est et Ouest.

2.3.2 Exemple d'élément architectural en climat tropical : cour intérieure et atrium

L'aménagement d'une cour intérieure peut jouer un rôle de régulateur thermique : une bonne végétation peut permettre de stocker l'apport de chaleur, tandis que les murs alentours font généralement obstacle au soleil pendant la journée et fournissent ainsi un cadre de vie plus agréable.



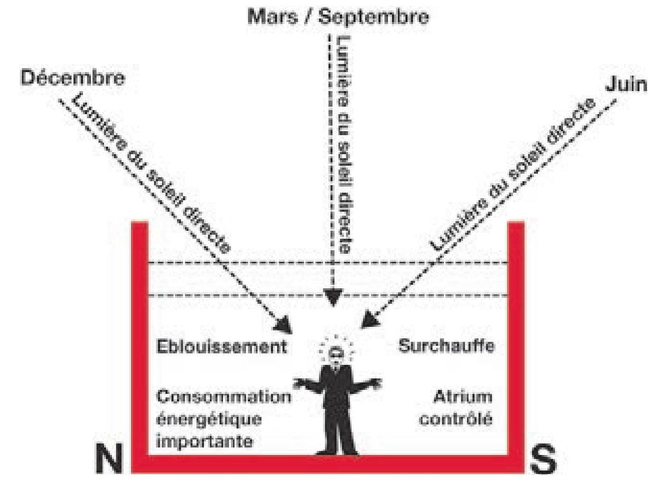
Illustration 2.15 : Cour intérieure, Whitesands resort Philippines



Source : www.whitesands.com.ph (consultation novembre 2014).

Les atriums sont considérés comme des solutions permettant de protéger les cours intérieures en les séparant de conditions climatiques extérieures parfois extrêmes. La conception d'un atrium demande cependant une bonne considération de toutes les conséquences potentielles sur le confort intérieur du bâtiment. Une étude portant sur les centres commerciaux en Malaisie[17] a ainsi révélé certaines limites souvent ignorées des atriums en milieu tropical, résultant dans des coûts de maintenance élevés et de fortes consommations énergétiques.

Illustration 2.16 : Problèmes liés aux atriums traditionnels

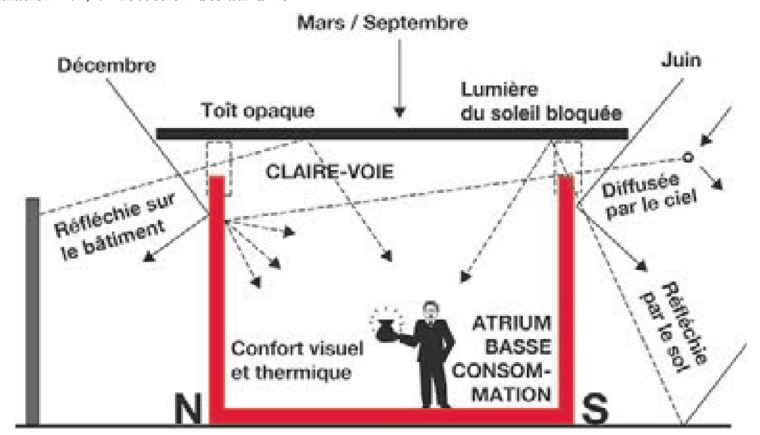


Source : ENERGIES 2050, d'après Hamdan Ahmad M et al., 2000, pp. 4-6.

17. Hamdan Ahmad M et al., 2000, pp. 4-6.

Comme l'indique cette illustration, le problème principal se situe dans l'exposition directe des structures de verre aux rayonnements du soleil, qui peut amener éblouissement et températures intérieures élevées, et par conséquent un usage excessif de l'air conditionné. Toujours selon cette étude, ce problème peut néanmoins être résolu ou atténué en utilisant des systèmes d'ombrages et de protections des côtés les plus exposés.

Illustration 2.17 : Protection des atriums



Source : ENERGIES 2050, d'après Hamdan Ahmad M et al., 2000, pp. 4-6.

Le choix d'un atrium, s'il permet d'accroître le confort interne du bâtiment, doit donc s'accompagner de mesures complémentaires afin d'éviter les inconvénients évoqués ci-dessus.

2.3.3 Exemple d'architecture en climat tropical sec : la voûte nubienne

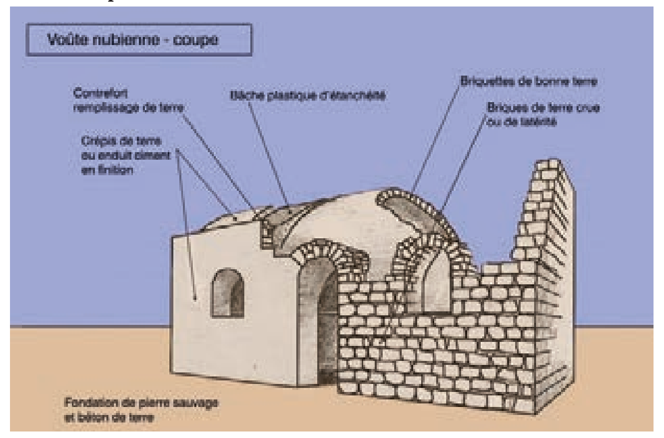
Élément architectural répandu en Afrique sahélienne, la voûte nubienne est une technique de construction utilisant des toitures voûtées réalisées en terre. La technique de voûte nubienne présente de nombreux avantages, notamment :

- l'utilisation de la terre constitue une alternative aux constructions en tôle (matériau généralement proposé aux populations d'Afrique Sahélienne), inadaptées aussi bien d'un point de vue économique (importations des matériaux) que du confort des occupants[18] ;
- Selon le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM)[19], la voûte nubienne permet de pallier le manque de ressources ligneuses telles que le bois ou la paille, et d'atténuer ainsi le rythme de déforestation élevé dans la région, tout en limitant l'importation de matériaux tels que la tôle, le ciment ou les chevrons ;

18. www.lavoutenubienne.org (consultation novembre 2014).
19. FFEM, site http://www.ffem.fr (consultation novembre 2014).

- Du point de vue du confort, les bâtiments avec voûte nubienne présentent par ailleurs une meilleure inertie thermique (structure épaisse en terre) et permettent donc de mieux contrôler le climat intérieur en atténuant les fluctuations de températures entre le jour et la nuit à l'intérieur; la chaleur est ainsi absorbée en journée, avec un relâchement déphasé durant la nuit.

Illustration 2.18: Principes de construction de voûte nubienne.



Source: www.lavoutenubienne.org (consultation novembre 2014).

Illustration 2.19: Voûte nubienne à étage, Boromo, Burkina Faso.



Source: www.lavoutenubienne.org (consultation novembre 2014).

Ces exemples illustrent la nécessité d'adapter la forme et structure du bâtiment aux conditions non seulement climatiques mais également économiques et sociales locales. La promotion d'une architecture traditionnelle peut permettre de répondre à ces objectifs: voûte nubienne et constructions en terre en Afrique Sahélienne, ou constructions en bois en Asie du Sud-Est par exemple.

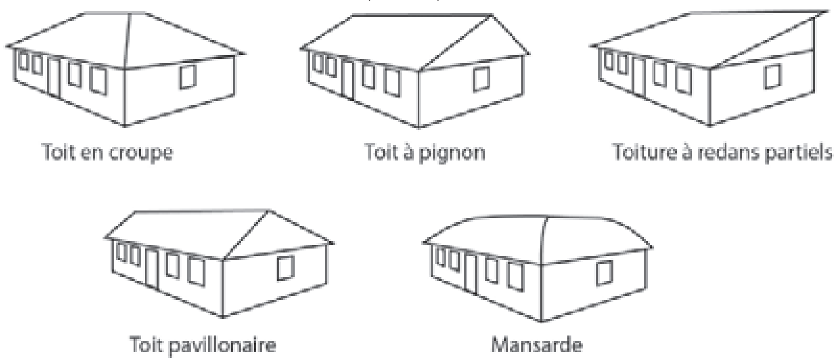
2.4 Choix de l'enveloppe du bâtiment

L'enveloppe joue un rôle crucial dans la conception d'un bâtiment vert et notamment dans les stratégies de ventilation et d'éclairage passifs. Nous reviendrons sur ce rôle dans les prochaines sections (chapitres 3 et 4), mais quelques considérations d'ordre général peuvent déjà être apportées.

2.4.1 Toits

Parmi les différentes parties de l'enveloppe d'un bâtiment, les toits sont les plus directement exposés aux radiations solaires et doivent donc être conçus afin de limiter les apports de chaleur. Différents éléments, tels que la forme, la structure ou la présence de combles doivent être considérés.

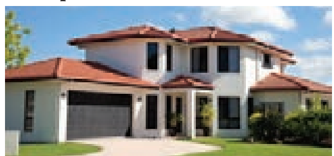
Illustration 2.20 : Formes de toits communes (Malaisie)



Source : ENERGIES 2050, d'après Wannah Enterprise (consultation du site novembre 2014).

En climat tropical humide, on privilégiera généralement une structure avec une inclinaison favorisant l'évacuation des eaux de pluie et les toits étendus afin de fournir une protection supplémentaire contre les radiations solaires. Le choix de cette structure (et notamment de son orientation et degré d'inclinaison) peut également prendre en compte la possibilité d'installation d'énergies renouvelables.

Illustration 2.21 : Exemple d'ombrage fourni par les avant-toits, Australie



Source : www.wilroof.com.au (consultation novembre 2014).

Outre la structure, les matériaux utilisés et le niveau d'isolation auront un impact élevé sur la thermie du bâtiment et le confort intérieur. Une méthode simple visant à réduire les transferts thermiques peut être l'utilisation de surfaces à forts coefficients de réflexion lumineuse (surfaces blanches ou ajout de feuilles de métal en aluminium par exemple).

Illustration 2.22: Exemple de feuilles de métal en aluminium sur toits



Source: www.manaksia.com (consultation novembre 2014).

Une autre solution consiste à utiliser de la végétation (toits verts) comme protection aux rayons du soleil, même si l'inclinaison du toit peut parfois rendre cette solution plus difficile à mettre en œuvre. Il est enfin possible d'ajouter des matériaux d'isolation aux structures de base.

2.4.2 Principes généraux concernant les parois extérieures

Comme nous l'avons vu précédemment, une paroi exposée à l'environnement extérieur est sujette à des échanges simultanés de chaleur par conduction et radiation. Chaque surface et matériel utilisés montrent des propriétés différentes dans ces échanges: une surface sombre et exposée au soleil atteindra ainsi des températures qui pourront être nettement supérieures à celles de l'air ambiant extérieur.

Deux éléments entrent ici en considération: la conductivité et l'inertie thermique des parois. Des matériaux avec faible conductivité ou combinés à une certaine isolation peuvent permettre d'atténuer l'impact des variations extérieures et sont notamment conseillés dans les bâtiments utilisant l'air conditionné afin de réduire les apports de chaleur. Dans les climats tropicaux humides, les conditions varient peu et rendent l'utilisation d'une forte inertie thermique (relâchement déphasé de la chaleur) peu conseillée: les murs doivent donc être légers et avoir des propriétés réflectives élevées, au moins aux endroits les plus exposés aux radiations solaires.

Il faut par ailleurs considérer que les murs Sud et Nord recevront généralement moins de radiations à mesure que l'on se rapproche de l'Équateur, et que l'utilisation de protections de type débords de toits et auvents sera donc souvent suffisante pour ces façades. Elles seront cependant peu efficaces pour celles orientées Ouest et Est, considérant l'angle d'incidence assez plat du soleil dans ces directions (cf. chapitre 4).



2.4.3 Les fenêtres

Combinés à l'orientation du bâtiment, la taille, le nombre et l'emplacement des fenêtres doivent notamment permettre de trouver un équilibre pour :

- éviter des apports de chaleur trop importants ;
- favoriser l'éclairage naturel tout en limitant les risques d'éblouissement ;
- favoriser la ventilation naturelle tout en limitant une circulation de l'air trop rapide et la pollution sonore créée par les bruits extérieurs ;
- offrir une vue sur l'extérieur tout en respectant l'intimité du bâtiment.

De manière générale, en climat chaud, les fenêtres doivent éviter une exposition directe au ciel, principale source d'éblouissement, et doivent de préférence être larges et ouvrables afin de permettre une meilleure ventilation naturelle (fenêtres persiennes ou à la française par exemple) lorsque l'humidité est élevée.


Illustration 2.23 : Fenêtres persiennes



Source : www.persiennes.net (consultation novembre 2014).

Outre une meilleure isolation pour éviter les gains de chaleur, certaines méthodes simples permettent d'atténuer les effets négatifs des vitrages en termes de luminosité :

- ***Vitres teintées*** : réduit la conductivité thermique et les transferts de chaleur ;
- ***Enduction*** : revêtement de fines couches de métal qui permettent de réduire efficacement la conductivité thermique mais présente des risques d'éblouissement pour les occupants des bâtiments voisins ;
- ***Technologies plus avancées*** où le verre est traité pour réduire son émissivité. Cela peut notamment être utilisé lorsque les techniques d'ombrages sont inefficaces, notamment sur les façades Ouest ou Est.

Nous aborderons ces sujets plus en détails dans les chapitres 4 et 5.

2.4.4 Choix des matériaux

La sélection des matériaux de construction d'un bâtiment devra tenir compte[20] :

- De l'énergie grise contenue dans les matériaux (énergie notamment dépensée lors de leur production et de leur transport) : il sera ainsi préférable d'opter pour des ressources locales plutôt qu'importées (voir tableau 2.5) ;
- De la méthode de production des matériaux : privilégier les matières (par exemple bois) provenant d'une exploitation durable dont les processus ne nuisent pas à l'environnement, en suivant notamment les programmes de certification ;
- Du cycle de vie des matériaux : si possible opter pour des matériaux recyclés ou recyclables et non polluants, par exemple filière de brique en terre cuite (voir encadré 2.5) ;
- Des méthodes d'entretien : privilégier les matériaux qui demandent peu d'entretien ou dont la maintenance aura un impact environnemental limité ;
- De la durabilité de la structure et de l'adaptabilité des matériaux aux conditions climatiques locales ;
- De l'inertie thermique recherchée (voir tableau 2.6).

Tableau 2.5 : Exemples d'énergie grise de certains matériaux (variables selon les régions et les méthodes de production)

Type de matériau	Énergie grise (en kWh/m³)
Métaux	
Acier	60 000
Cuivre	140 000
Zinc-titane	180 000
Aluminium	190 000
Canalisations	
Tuyau en grès	3 200
Tuyau fibrociment	4 000
Tuyau PVC	27 000
Tuyau d'acier	60 000
Murs porteurs	
Béton poreux	200
Brique terre cuite (nids d'abeille)	450
Béton	500
Béton armé	1 850
Enduits	
À la chaux	450
Plâtre	750
Ciment	1 100

Type de matériau	Énergie grise (en kWh/m³)
Charpente	
Bois d'œuvre	180
Bois lamellé-collé	2 200
Cloisons légères	
Panneau de plâtre fibreux	900
Panneau d'aggloméré	2 200
Panneau fibre de bois (dur)	3 800
Contreplaqué	4 000
Isolation thermique	
Fibres de lin	30
Cellulose de bois	50
Laine de roche	150
Perlite	230
Laine de verre	250
Polystyrène expansé	450
Polystyrène extrudé	850
Etanchéité	
Asphalte coulé	1 950

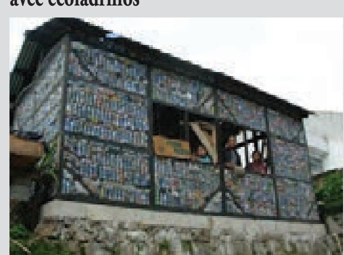
Source : Becare – Pipet, Gouvernement de la Nouvelle Caledonie, Ademe, 2008, p. 11.

20. Cairns Regional Council, 2011.

Encadré 2.5 : Matériaux de construction et recyclage des déchets : les ecoladrillos (ou briques écologiques)

Une technique particulière d'« ecoladrillos » s'est développée depuis plusieurs années en Amérique du Sud dans le cadre d'habitations informelles. Des bouteilles en verre vides sont remplies de déchets non biodégradables et sont ensuite utilisées comme matériaux de construction, tel qu'illustré ci-dessous :

Illustration 2.24 : Maison bâtie avec ecoladrillos



Source : Institut Mésoaméricain de Permaculture, imapermacultura.wordpress.com (consultation novembre 2014).

Les bénéfices sont ici nombreux :

- Réduction de la contamination et pollution des sols ;
- Coûts quasi nuls qui permettent à des familles modestes d'accéder à un logement décent ;
- Faible énergie grise et économies en extraction de matériaux et en transports ;
- Matériau relativement isolant.

Tableau 2.6 : Caractéristiques thermo-physiques des principaux matériaux de construction en Afrique tropicale

Matériaux	Conductivités thermiques [W/m.k]	Masses volumiques [kg/m³]	Chaleurs massiques [kJ/kg.k]
Cendre sèche	0,29	900	0,75
Charbon de bois	0,041 – 0,065	185 - 215	
Coton	0,06	80	1,42
Cuir	0,174	1000	
Écorce d'arbre	0,066	342	
Laine de bois (panneau)	0,09	400	
Laine de mouton	0,038 – 0,049	135 – 136	1,26
Laine de roche	0,052 – 0,074	120 – 220	0,8 – 0,84
Paille comprimée	0,12	140	
Papier	0,14		
Plume	0,037	80	

Tableau 2.6 : Caractéristiques thermo-physiques des principaux matériaux de construction en Afrique tropicale (*suite*)

Matériaux	Conductivités thermiques [W/m.k]	Masses volumiques [kg/m³]	Chaleurs massiques [kJ/kg.k]
Roseau	0,05	75	
Sciure de bois	0,06 – 0,07	213	2,51
Soie naturelle	0,052	100	
Amiante de ciment	0,4	1800	0,96
Béton de pouzzolane naturel	0,25 – 0,6	1200 – 1700	
Géobéton	0,7 – 0,8	1800 – 2310	
Béton armé	1,5 – 2,04	2300 – 2400	1,09
Bitume	0,16	2050	
Contreplaqué	0,14	600	2,72
Enduit à la chaux ou au plâtre lissé	0,87	1600	0,94
Enduit au ciment	0,87	2200	1,05
Copeaux de bois	0,081	140	2,51
Béton	0,9 – 1,7	2200 – 2400	0,850 – 0,950
Pierre calcaire	1,05 – 2,2	1650 – 2580	0,920
Terre cuite	1,15	1800 – 2000	0,900
Mur brique pleine	0,85	1850	
Mur brique creuse	0,4	1200	0,880
Parpaing plein	1,1	2100	
Parpaing creux	0,67	1250	0,880
Enduit mortier	1,15	1800 – 2100	0,880
Enduit plâtre	0,45	1450	0,880
Bois naturel	0,12 – 0,044	300 – 750	0,900
Polystyrène expansé	0,036 – 0,044	9 – 35	1,200 – 1,800
Laine de verre	0,04	100 – 300	1,210
Carrelage	1,15	1800	0,700
Gravillons	1,5	1200	0 ,980
Pierre lourde	3,5	2800	0,920
Feuille de bitume	0,23	1000	0,8000
Terre pressée	1,15	1800	0,900
Tôle	70	7800	0,800

Source : IEPF, 2006, p. 22.

2.5 Plan de masse

Notons pour conclure ce chapitre qu'une majeure partie des paramètres à considérer peuvent être intégrés au sein d'un plan de masse bioclimatique, tel que représenté ci-dessous. Celui-ci peut inclure notamment les nuisances sonores à proximité, la trajectoire du soleil, le potentiel venteux, le cycle de l'eau ou encore les contraintes liées à l'urbanisme. Il devra également tenir compte de la gestion des déchets, avec des espaces prévus pour les bennes et les poubelles, et éventuellement des installations pour compostage et recyclage in situ.

Illustration 2.25 : Exemple de plan de masse bioclimatique

Source : ENERGIES 2050, d'après www.lesenr.fr (consultation novembre 2014).

Références

3E, 2010. *Études de vents dans trois sites en république d'Haïti,* Bruxelles, Belgique, disponible via http://www.bme.gouv.ht/Carte%20des%20vents/PR_PR101252_Final_report_part1_ResultatsCampagnesDeMesures_final.pdf.

Baker N.V., 1987. *Passive and Low Energy Building Design For Tropical Island Climates*, Commonwealth Science Council, ECD Partnership, Londres, Royaume-Uni.

Becaret-Pipet, Gouvernement de la Nouvelle Caledonie, Ademe, 2008. *Guide des matériaux et systèmes disponibles en Nouvelle Calédonie favorisant la maîtrise de l'énergie dans l'habitat*, Lancement et suivi technique de l'opération de qualification ecocal, phase 1.

Bodart M., Deneyer A., s.d. *Guide d'aide à l'interprétation et à l'amélioration des résultats des mesures sous les ciels et soleils artificiels du CSTC,* Centre Scientifique et Technique de la construction et Université Catholique de Louvain, Belgique, accessible via http://www-energie.arch.ucl.ac.be/eclairage/documents%20pdf/Guide-evaluation-resultats.pdf.

Cairns Regional Council, 2011. *Sustainable Tropical Building Design, Guidelines for Commercial Buildings*, Conseil Régional du Cairns, Australie, disponible via http://www.cairns.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/45642/BuildingDesign.pdf.

Délégation Académique à l'Hygiène et à la Sécurité (DAHS), 2012. *Règles d'hygiène et de sécurité dans les locaux d'enseignement général*, académie/rectorat de la Réunion, Ministère de l'Éducation Nationale, de la Jeunesse et de la Vie Associative, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, Saint Denis, Réunion.

Fanger, P. O., 1967. *Calculation of thermal comfort : Introduction of a basic comfort equation,* ASHRAE Transactions, vol. 73 (2), pp. III 4.1 – III 4.20.

GRET, 1986. *Bioclimatisme en zone tropicale, construire avec le climat*, Dossier Technologies et Développement du Ministère de la coopération française, Programme Rexcoop.

Hamdan Ahmad M., Tajuddin M. et Rasdi M., 2000. *Design principles of atrium buildings for the tropics*, Université Technologique Malaysia, Skudai, Malaisie.

Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie, 2006. *Efficacité Energétique de la climatisation en région tropicale, tome 1 : conception des nouveaux bâtiments*, IEPF, Québec, Canada, disponible via http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME1.PDF.

McMullan, 2007. *Environmental Science in Building, 6th edition*, Palgrave McMillan Editions, London.

Solener, 2014. *L'architecture bioclimatique en climat tropical humide : Conception thermique,* Module pour l'Initiative pour la Promotion des Villes Durables en Afrique, octobre 2014, Lomé, Togo.

Solener, ADEME, 2014. *Guide climatisation tertiaire en Guyane,* ADEME Guyane (version d'octobre 2013).

Université De Montfort, Painter B., 2011. *Passive Design, Energy in Buildings*, module du MSc Sustainable Development and Climate Change, Université de Montfort, Leicester, Royaume-Uni.

Sites internet *(dernière consultation en janvier 2015)* et sources additionnelles des illustrations

Association la voûte Nubienne : www.lavoutenubienne.org

Australia's Guide to environmentally Sustainable Homes, Gouvernement Australien : https://yourhome.infoservices.com.au/

Cellule de Recherche en Architecture et Climat de l'Université Catholique de Louvain, Département de l'Énergie et du Développement durable de Wallonie, Site Energie + : http://www.energieplus-lesite.be

Centre National de Recherches Météorologiques - Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique : www.cnrm.meteo.fr

Deparis : http://www.deparisnet.be/chaleur/FAQ/FAQ_chaleur5_indices.pdf

Enabling Environment Australia : www.enablingenvironments.com.au

Fonds Français pour l'Environnement Mondial : http://www.ffem.fr

Gratia E., Université catholique de Louvain : http://www-energie2.arch.ucl.ac.be/

Gaisma (diagrammes solaires) : www.gaisma.com

Green Passive Solar Magazine : http://greenpassivesolar.com/

Infociments, l'acoustique et le bâtiment : www.infociments.fr/telecharger/CT-B41.12-29.pdf

Institut Mésoaméricain de Permaculture : www.imapermacultura.wordpress.com

Les ENR : http://www.lesenr.fr/les-actualites/583-cpecoquartiergarepantin.html

Manaksia : http://www.manaksia.com/

Tutoriels du Palomar College Anthropology : http://anthro.palomar.edu/tutorials/

Persiennes.net : http://www.persiennes.net/

Wannah enterprise : http://wannah.net

White Sands Resort, Philippines : http://www.whitesands.com.ph

Wilroof Australia : http://www.wilroof.com.au/

Chapitre 3
Ventilation et systèmes de refroidissement naturels

La ventilation d'un bâtiment peut être définie, dans sa composante la plus basique, comme le processus par lequel l'air intérieur est remplacé par un air plus sain provenant de l'extérieur ou d'une source propre ; un processus nécessaire lié à la pollution rapide de l'air ambiant (air vicié) avec des poussières, des composés organiques volatiles, des odeurs, de l'humidité ou encore des fumées de cigarettes.

Ce processus doit être continu et remplir de nombreux objectifs, parmi lesquels :

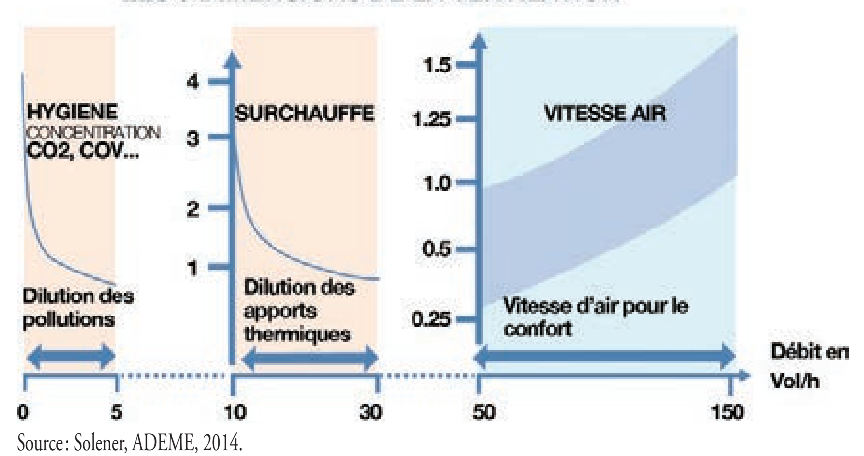
- Fournir de l'oxygène et extraire le dioxyde de carbone provenant de la respiration des occupants ;
- Contrôler l'humidité dans une optique de confort ou de conditionnement des matériaux ;
- Contrôler la vitesse de circulation de l'air ;
- Retirer les polluants tels que les odeurs, les micro-organismes, les mites, etc. ;
- Retirer les vapeurs d'eau pour éviter la condensation ;
- Retirer les particules telles que fumées et poussières ;
- Retirer les composés organiques volatiles provenant des tapis ou des meubles ;
- Retirer les produits de combustion, notamment liés à la cuisine ;
- Retirer les gaz d'ozone liés aux photocopieurs ; et
- Retirer le méthane et les produits de désintégration provenant des sols.

En outre, la ventilation naturelle peut également permettre de contrôler les apports excessifs de chaleur et d'atteindre des objectifs de confort : la température ressentie peut baisser de 4°C avec une vitesse d'air de 1m/s[1].

Les différentes fonctions de la ventilation naturelle varieront, en fonction du débit, de simple fonction hygiénique à l'évacuation des apports thermiques et à une vitesse d'air nécessaire au confort hygrométrique et olfactif des occupants.

1. Solener, ADEME, 2014.


Illustration 3.1 : les fonctions de la ventilation



Source : Solener, ADEME, 2014.

Comme nous l'avons constaté dans le chapitre précédent, les besoins en matière de ventilation varient selon les taux d'occupation et l'utilisation des pièces du bâtiment.

3.1 Avantages de la ventilation naturelle

L'utilisation de processus de ventilation naturels présente de nombreux atouts tant sur le plan économique que sur celui de l'environnement et du confort des occupants.

3.1.1 Avantages économiques

Au niveau économique, une stratégie de ventilation naturelle intégrée dès la conception du bâtiment peut permettre de réduire les coûts de construction (réduction des besoins en systèmes mécaniques de ventilation) dans des proportions variables en fonction des pays et du type de bâtiment. Ces économies étaient évaluées, à titre d'exemple, à 10 à 15 % du coût total des bâtiments non domestiques au Royaume-Uni comparativement à des constructions similaires disposant d'air conditionné.[2]

Par ailleurs, une ventilation naturelle permettra de réduire les coûts, souvent considérables en régions tropicales, liés à la consommation énergétique des systèmes de ventilation mécanique ou d'air conditionné. Elle amènera parallèlement une plus grande résilience du bâtiment et une réduction des frais d'entretien et de réparation de ces systèmes parfois très complexes.

2. DETR CIBSE, 1998, p. 4.

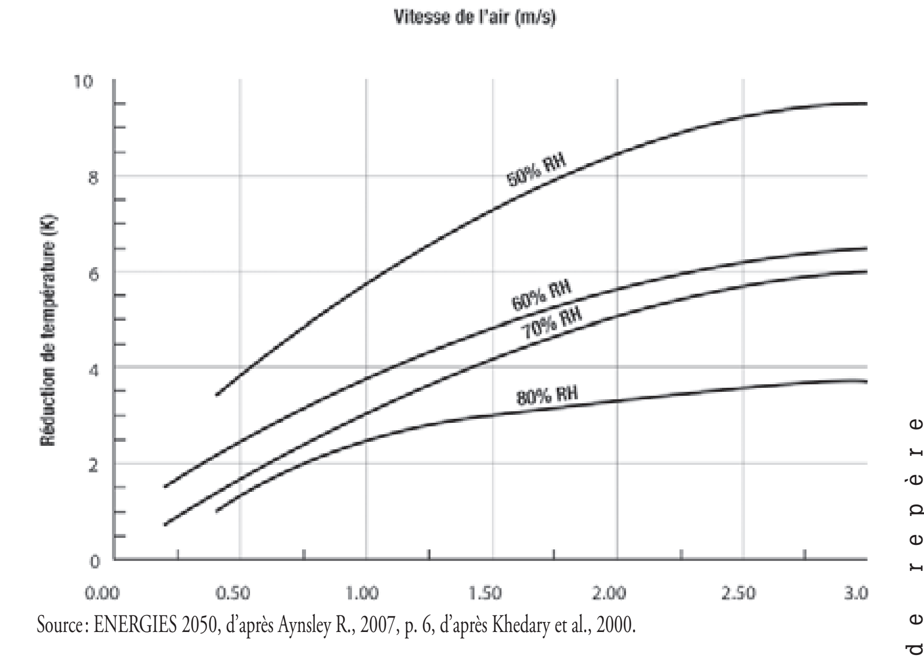
3.1.2 Confort

Un système de ventilation naturelle peut également permettre d'accroître le confort intérieur du bâtiment. Il offre notamment des conditions intérieures plus proches de celles trouvées à l'extérieur et évite ainsi les méfaits éventuels des chocs thermiques liés à l'usage d'air conditionné.

D'autre part, une ventilation naturelle offre plus de flexibilité et de contrôle aux occupants, ceux-ci pouvant notamment modifier l'aération (en ouvrant ou fermant une fenêtre par exemple) en fonction des besoins ponctuels. Ce contrôle accru serait également bénéfique en termes de santé et de productivité selon certaines études[3].

La ventilation joue enfin en rôle important afin de tempérer l'humidité et les températures des espaces intérieurs, même s'il convient de balancer cet effet avec les risques d'inconforts liés à la vitesse de l'air. Une vitesse de 1m/s peut ainsi permettre d'accroître la température de confort jusqu'à 30-31°C[4] (différence entre température ressentie et température ambiante de l'ordre de 4°C).

Illustration 3.2 : Effet de refroidissement lié à la ventilation en fonction des températures et de l'humidité relative (RH)



Source : ENERGIES 2050, d'après Aynsley R., 2007, p. 6, d'après Khedary et al., 2000.

3. DETR CIBSE, 1998, p. 4.

4. Solener, 2014b.

3.1.3 Bénéfices environnementaux

La réduction de la charge en climatisation et en air conditionné additionnée aux économies d'équipements amènera mécaniquement une baisse des émissions de gaz à effet de serre associées aux activités du bâtiment. Parmi les autres avantages figure également la réduction de la pollution liée à l'utilisation de produits d'entretien des systèmes de ventilation mécanique.

Il faut noter cependant qu'ouvrir le bâtiment pour une ventilation naturelle peut néanmoins le rendre plus vulnérable à des nuisances telles que les vents, les pluies, les bruits extérieurs et les poussières, ou encore aux risques d'intrusions. Tous ces paramètres sont à prendre en considération dans la conception d'une ventilation naturelle.

3.2 Principes de la ventilation naturelle

Les bénéfices évoqués reposent sur une conception adaptée du système de ventilation aux besoins et au site. Les sections ci-dessous rappellent certains principes de fonctionnement et les différents facteurs à considérer pour atteindre cet objectif. Il convient néanmoins de rappeler qu'il s'agit d'un phénomène complexe influencé par des paramètres physiques pouvant avoir un fort impact au niveau local.

La ventilation naturelle d'un bâtiment est basée sur deux principes distincts et complémentaires :

- La ventilation transversale, qui repose sur une circulation de l'air provoquée par les vents extérieurs pénétrant le bâtiment et évacuant ainsi l'air vicié[5] ;
- L'effet de cheminée, qui repose lui sur les gradients de températures entre extérieur et intérieur et sur la dilatation de l'air sous l'effet de la chaleur.

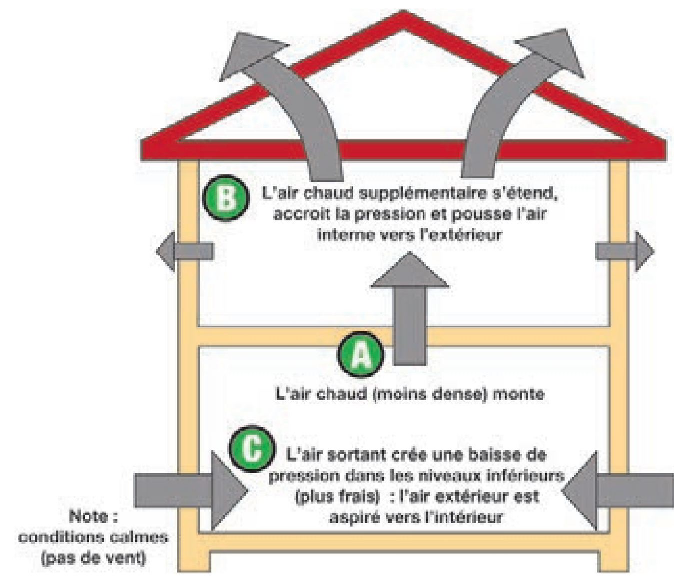
3.2.1 Ventilation par effet de cheminée / tirage thermique

3.2.1.1 Principes et concepts

Particulièrement adaptée lorsque l'exposition aux vents extérieurs du bâtiment est contrainte par une forte urbanisation ou des obstacles naturels, une ventilation par effet de cheminée (tirage thermique) repose sur la circulation de l'air créée par des gradients de températures entre extérieur et intérieur : l'air plus chaud se dilate et remonte sous l'effet de la gravité, la densité de l'air au niveau du sol diminue et ce différentiel de pression amène un mouvement de l'air tel qu'illustré ci-après.

5. Air ayant déjà « servi », n'étant plus assez sain, pollué notamment par l'occupation des personnes.

Illustration 3.3 : Effet de cheminée



Source : ENERGIES 2050, d'après www.heimlerheatcoolplumb.com (consultation novembre 2014).

L'effet de cheminée repose donc sur un minimum de deux ouvertures (fenêtres ou autres) dans les parois, l'une située en hauteur pour l'évacuation de l'air chaud, l'autre à un niveau bas pour l'entrée d'air frais. La vélocité de la circulation de l'air sous l'effet de cheminée peut-être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$(1)\ Q = CS\sqrt{2gh\frac{T_i - T_o}{T_i}}$$

Où,

- Q = Vitesse de circulation de l'air (m^3/s) ;
- S = Surface du flux (m^2), correspondant à la surface de l'ouverture la plus étroite ;
- C = coefficient de décharge de l'orifice le plus étroit, variable en fonction de ses caractéristiques (généralement autour de 0,65) ;
- g = accélération liée à la pesanteur, soit 9,81m/s^2 ;
- h = différence de hauteur entre les deux ouvertures (m) ; et
- To – Ti est la différence entre les températures extérieures et intérieures (K).

Partant de cette équation, la vitesse du flux d'air par effet de cheminée augmentera donc en fonction de :

- La taille de la plus étroite des ouvertures et de son coefficient de décharge. Plus cette taille s'accroît, plus la vitesse de circulation de l'air augmente ;

- La hauteur entre les ouvertures : plus cette hauteur est grande, plus la vélocité s'accroît ;
- La différence de température entre extérieur et intérieur.

Chacune de ces variables peut être exploitée dans la conception passive d'un bâtiment, comme nous le verrons ci-dessous.

Encadré 3.1 : Cas spécifique du tirage thermique dans les milieux tropicaux chauds

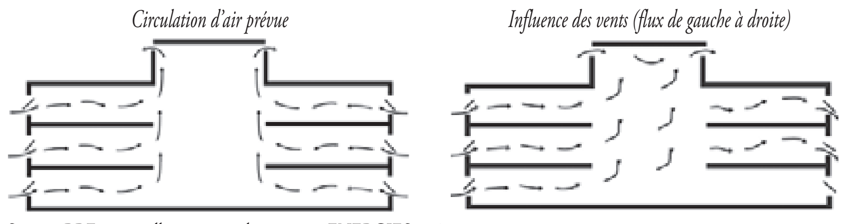
En milieu tropical chaud et particulièrement en journée, les températures intérieures sont en général inférieures à celles de l'extérieur (différentiel To-Ti négatif). Dans ce cas, le processus décrit ci-dessus peut s'inverser : l'air plus frais est évacué à travers l'ouverture inférieure et l'air extérieur entre par l'ouverture supérieure. Cette entrée d'air chaud voire humide peut alors représenter un problème qui doit être pris en compte dans la conception du système de ventilation[a]. L'ouverture supérieure devra notamment être protégée du soleil et si possible localisée légèrement en intérieur afin de limiter le niveau des apports thermiques (ouverture sous avant-toit par exemple).

a. Lokman et al., 2011.

3.2.1.2 Risques liés aux vents extérieurs

En pratique, il est courant qu'un bâtiment dispose de systèmes d'aération complexes dotés de plusieurs ouvertures, notamment dans des bâtiments à plusieurs étages. De forts vents peuvent alors amener un flux depuis l'extérieur plus élevé que celui lié aux simples différentiels de pression. La circulation de l'air peut être perturbée et l'air vicié être poussé vers les zones du bâtiment situées en aval, comme le montre l'illustration ci-dessous :

Illustration 3.4 : Perturbation de la circulation d'air par vents extérieurs



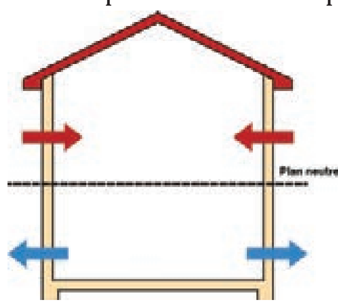
Source : BRE, 1997, illustration redessinée par ENERGIES 2050.

Dans ce cas une orientation légèrement décalée du bâtiment par rapport aux vents dominants sera préférable.

3.2.1.3 Gestion de la taille relative des ouvertures

Une bonne planification de la taille et de l'emplacement des ouvertures est donc une étape importante du processus. Une taille similaire d'ouverture en bas et en haut va créer un équilibre de pression de l'air à mi-distance entre les ouvertures, comme le montre l'illustration ci-dessous.

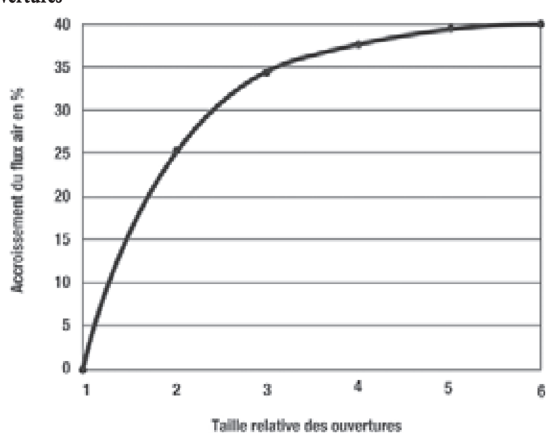
Illustration 3.5 : Équilibre de pression d'air pour ouvertures de tailles équivalentes



Source : ENERGIES 2050, d'après Lokman et al., 2011.

Changer cet équilibre peut néanmoins être bénéfique : en journée en milieu tropical, agrandir la taille de l'ouverture du bas (ou rétrécir celle du haut) peut amener un rabaissement de la ligne d'équilibre et une circulation d'air plus turbulente pouvant notamment être utilisée dans des stratégies de rafraîchissement de chaleur latente.[6] L'illustration suivante montre la relation linéaire entre accroissement de la vitesse de l'air et taille relative (ou comparée) des ouvertures.

Illustration 3.6 : Exemple d'augmentation de la vitesse de l'air en fonction des variations relatives de la taille des ouvertures



Source : ENERGIES 2050, d'après Wei Fang, 2003.

6. Lokman et al., 2011.

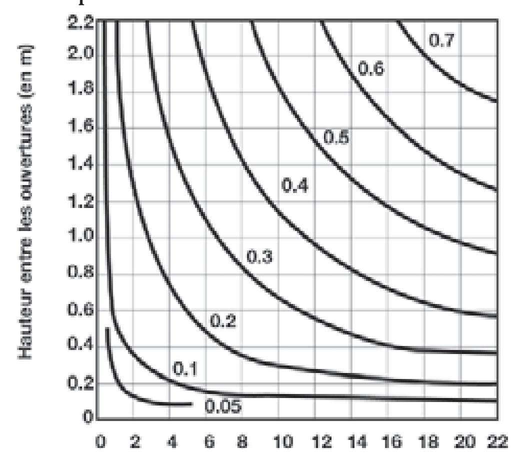
Dans cet exemple, une taille relative de 1 à 6 des ouvertures amènera une circulation de l'air accélérée de 40 % comparée à deux ouvertures de tailles égales. Ce quotient est néanmoins susceptible de varier en fonction des bâtiments et des sites.

3.2.1.4 Méthodes à considérer pour accroître l'efficacité

Accroître la hauteur H entre les ouvertures

Comme nous avons pu le voir, l'efficacité de l'effet cheminée dépend en partie de la distance entre les ouvertures hautes et basses du bâtiment.

Illustration 3.7 : Variations de la vélocité de circulation de l'air en fonction de la hauteur H et des différences de températures



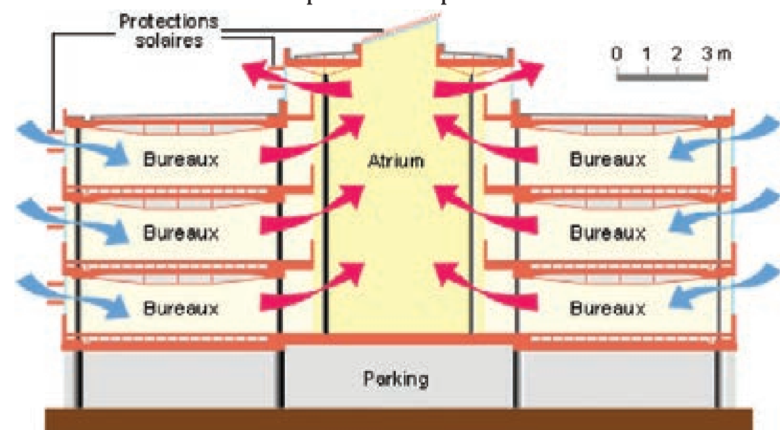
Source : ENERGIES 2050, d'après Evans M., 1980.

Ce type de ventilation naturelle sera donc d'autant plus efficace dans des bâtiments élevés, même si une bonne exploitation de la structure (par exemple en plaçant l'ouverture du haut dans des combles) peut permettre de compenser une hauteur plus modérée.

Utilisation d'un atrium

Si le bâtiment dispose d'une cour centrale dotée d'un atrium, cette structure peut être utilisée pour renforcer la circulation et l'évacuation de l'air, particulièrement si le bâtiment dispose de plusieurs étages, comme illustré ci-après.

Illustration 3.8 : Utilisation d'un atrium pour ventilation par effet de cheminée

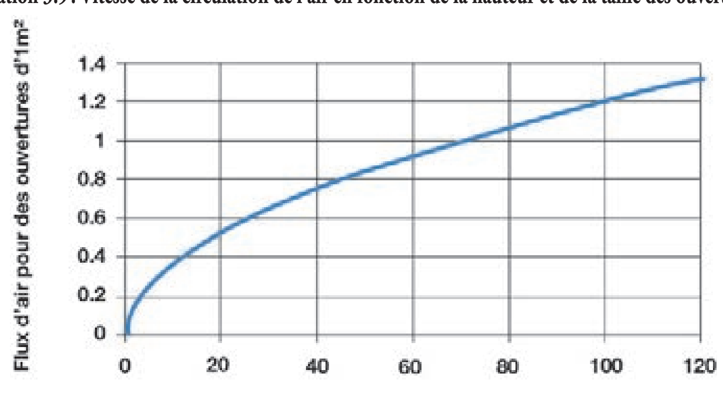


Source : Université Catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

Accroître la taille des ouvertures

Augmenter la dimension des ouvertures peut permettre d'accroître sensiblement l'entrée et la circulation de l'air dans le bâtiment. Ce choix devra cependant être balancé avec les objectifs de confort du bâtiment (et notamment la vitesse de circulation de l'air maximum) et également la nécessité de maîtriser l'entrée d'air chaud et humide en milieu tropical. Tout cela devra donc être soigneusement évalué durant les premières étapes de la conception.

Illustration 3.9 : Vitesse de la circulation de l'air en fonction de la hauteur et de la taille des ouvertures



Source : ENERGIES 2050 d'après www.architecture.com (consultation novembre 2014).

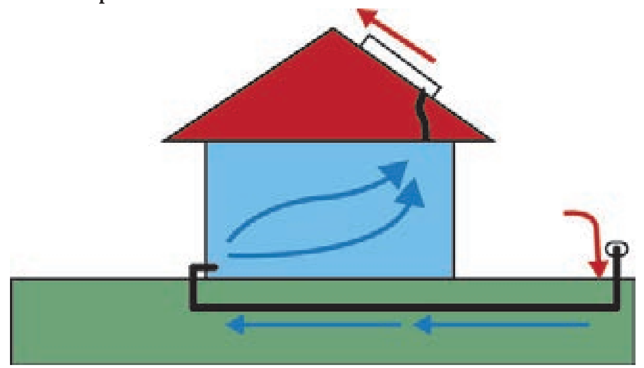


Différentiel de température

Il est enfin possible d'accroître l'effet lié au différentiel de température en utilisant une cheminée solaire, également appelée cheminée thermique, qui renforce le mouvement convectif de l'air en le chauffant passivement via un conduit exposé aux rayonnements du soleil.



Illustration 3.10 : Principes d'une cheminée solaire



Source : ENERGIES 2050 d'après « Renewable Energy for the Poor Man » (consultation du site novembre 2014).

Illustration 3.11 : Cheminées solaires sur bâtiments



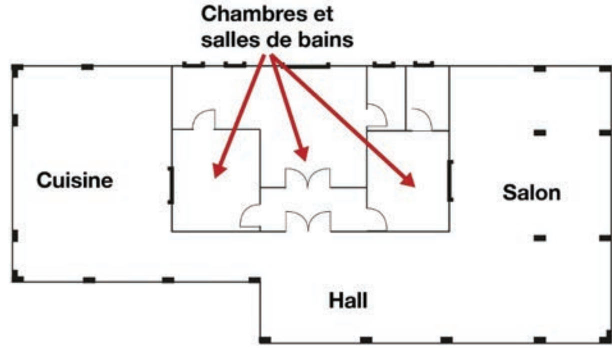
Source : www.outilssolaires.com (consultation novembre 2014).

L'utilisation d'une telle structure doit néanmoins s'accompagner d'une bonne isolation entre la cheminée et les espaces intérieurs afin de limiter les apports de chaleur non désirés.

Organisation interne du bâtiment

À l'image du « zonage » évoqué plus tôt dans cet ouvrage (Chapitre 2), une organisation efficace des différentes pièces peut grandement favoriser la circulation de l'air notamment en réduisant les obstacles (par exemple partitions internes), tel qu'illustré ci-dessous.

Illustration 3.12 : Exemple d'organisation interne favorisant la circulation de l'air en bâtiment domestique



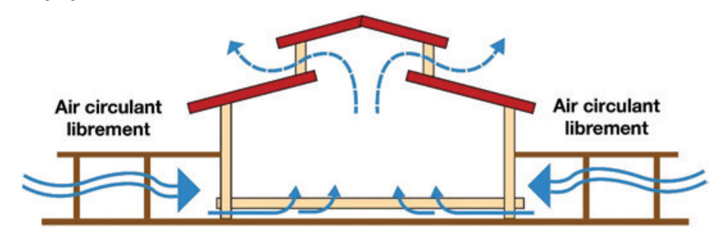
Source : ENERGIES 2050, d'après Lokman et al., 2011, p. 7.

Dans cet exemple, seules les pièces nécessitant une certaine intimité (chambres, salles de bains) sont dotées de partitions, les autres étant rassemblées dans un large espace ouvert. Cette méthode est néanmoins à modérer avec les objectifs de confort acoustique mais également thermique, en particulier au sein d'un bâtiment climatisé (cf. Chapitre 5).

Obstructions au niveau des ouvertures

Il est enfin critique de placer les ouvertures dans des endroits clairs avec peu ou pas d'obstructions, afin de ne pas bloquer la ventilation.

Illustration 3.13 : Absence d'obstructions favorisant la circulation de l'air



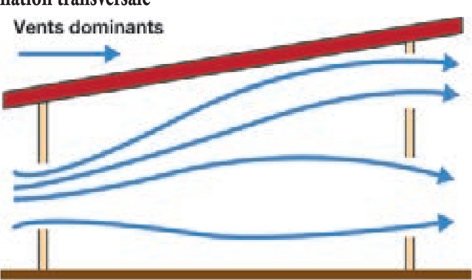
Source : ENERGIES 2050, d'après Lokman et al., 2011, p. 7.

Ces deux derniers conseils valent également pour la ventilation transversale, que nous allons étudier ci-après.

3.2.2 Ventilation transversale

La ventilation transversale peut être utilisée comme complément ou alternative plus puissante à l'effet de cheminée. Elle repose principalement sur la circulation des vents extérieurs et sur une bonne orientation du bâtiment et des ouvertures, telles que représentées schématiquement ci-dessous :

Illustration 3.14 : Ventilation transversale



Source : www.outilssolaires.com (consultation novembre 2014), illustration redessinée par ENERGIES 2050.

L'étude des vents dominants est donc la première étape à effectuer. Nous avons vu que certains outils, tels que la rose des vents (cf. Chapitre 1), permettaient d'étudier la direction, la fréquence et la puissance des vents sur un site donné. Cependant, les mesures sont en général prises à 10m de hauteur et à l'aéroport le plus proche, et ne prennent pas en compte plusieurs facteurs qui ont un impact élevé à un niveau micro-local.

Les éléments topographiques tels que les collines et montagnes jouent ainsi un rôle important dans la direction et la force des vents. Sur les versants exposés, la circulation de l'air peut être accélérée à hauteur de 54 %, tandis que les vents seront ralentis et leurs directions possiblement modifiées sur les versants abrités. Le tableau suivant présente des ratios d'accélération de la vitesse du vent en fonction de l'inclinaison des pentes d'une colline.

Tableau 3.1 : Coefficients de multiplication de la vitesse des vents, collines à versants exposés, pente supérieure à 33 %

Pente moyenne supérieure à 33 %	Partie (tiers) basse	Partie centrale	Partie haute	Dessus
	1	1.25	1.55	1.25

Source : Aynsley R., 2007.

L'utilisation du territoire aux alentours du site ainsi que les différents éléments naturels qui le composent jouent également un rôle important et influent sur la vitesse des vents et l'évolution des gradients en fonction de la hauteur.

Illustration 3.15 : Modification des gradients de vitesse des vents en fonction des obstacles

Source : ENERGIES 2050, d'après Baker, 1987.

Il sera ainsi plus aisé d'accéder à des vents plus rapides et à une hauteur modérée sur un site exposé.

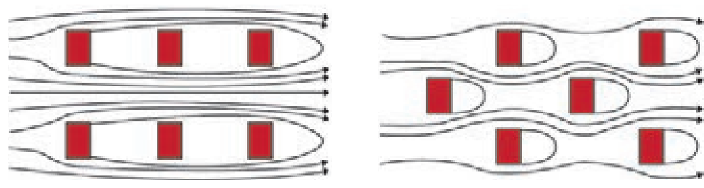
Tableau 3.2 : Coefficients d'ajustement de la vitesse des vents en fonction de la hauteur et du type de terrain

Hauteur au-dessus du sol (mètres)	Catégorie 1 (Étendue d'eau)	Catégorie 2 (Aéroport)	Catégorie 3 (Banlieue – densité urbaine moyenne)	Catégorie 4 (Zone urbaine dense)
500				159 %
400			159 %	146 %
300		159 %	152 %	132 %
200	156 %	152 %	143 %	114 %
100	147 %	140 %	128 %	89 %
50	138 %	128 %	113 %	69 %
30	132 %	119 %	101 %	58 %
20	126 %	112 %	93 %	50 %
15	123 %	107 %	86 %	45 %
10	117 %	100 % REF	77 %	39 %
9	116 %	98 %	75 %	37 %
8	115 %	96 %	72 %	36 %
7	113 %	94 %	69 %	34 %
6	111 %	91 %	66 %	32 %
5	109 %	88 %	62 %	30 %
4	106 %	84 %	57 %	28 %
3	102 %	79 %	51 %	25 %
2	97 %	72 %	42 %	
1	88 %	60 %	27 %	
0,5	84 %	48 %	11 %	

Source : D'après Aynsley R., 2007.

Si l'on prend comme référence la vitesse des vents mesurée à l'aéroport le plus proche et à 10 mètres de hauteur, on constate que cette vitesse aura diminué en moyenne d'environ 23 % en milieu semi-urbain et 61 % en milieu urbain dense à hauteur équivalente. Le placement du bâtiment en fonction des obstacles alentours aura également son importance et il est donc recommandé de s'éloigner ou de se décaler en prenant en compte le sens des vents dominants.

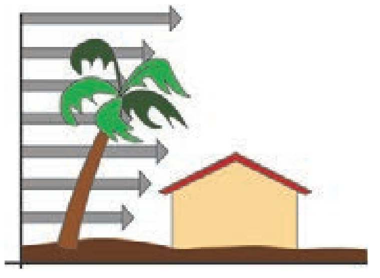
Illustration 3.16 : Effets de masque des bâtiments sur les vents



Source : Baker, 1987, p. 106, illustration redessinée par ENERGIES 2050.

Par ailleurs, la végétation, qui comme nous l'avons vu peut permettre une meilleure protection contre l'ensoleillement et les radiations solaires, ne doit pas faire obstruction à la circulation de l'air au niveau des parois. Une végétation haute avec des troncs fins peut permettre de remplir ces deux objectifs à la fois.

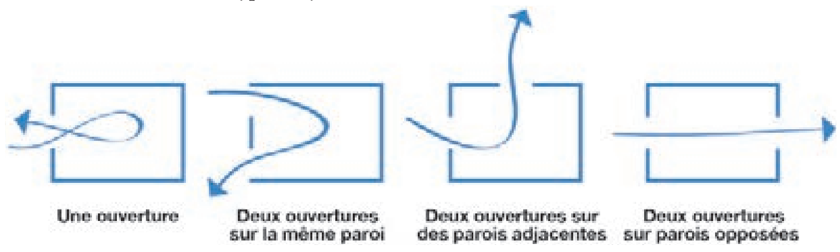
Illustration 3.17 : Impact d'une végétation à haut tronc



Source : Baker, 1987, p. 106, illustration redessinée par ENERGIES 2050.

3.2.2.1 Types de ventilation transversale

Illustration 3.18 : Différents types de systèmes de ventilation



Source : ENERGIES 2050, d'après www.commercialwindows.org (consultation novembre 2014).

Contrairement à l'effet de cheminée, il est possible d'instaurer une ventilation transversale avec une seule ouverture, si possible exposée aux vents, même si l'efficacité d'un tel système reste relativement faible avec un risque d'accumulation de l'air vicié au fond de la pièce. Une seconde ouverture sur la même façade présente les mêmes risques, particulièrement si la force des vents est assez élevée. La conception à privilégier ici est deux ouvertures sur des murs parallèles et dans la direction des vents.

Tableau 3.3: Récapitulatif des différents dispositifs et de l'effet recherché

Niveau de renouvellement d'air	Effet recherché	Vitesse en proportion des vents extérieurs, avec hauteur des ouvertures = 1/3 de celle de la paroi*	
		Largeur des fenêtres = 1/3 de celle de la paroi	Largeur des fenêtres = celle de la paroi
0,5 à 5 vol/h	**Santé** Débit hygiénique pour diminuer les pollutions, conformément à la réglementation	NA	
3 à 5 vol/h	**Confort hygrométrique** Abaissement partiel des températures	**12-14%**	**16-23%** (23% si double ouverture)
15 à 30 vol/h	**Confort** Abaissement efficace des températures et atteinte sur durée partielle du minimum de vitesse de l'air	**35-42%** (jusqu'à 45% pour ouvertures sur murs adjacents)	**47-65%** (limitée à 51% pour ouvertures sur murs adjacents)
50 vol/ et au-delà	**Confort** Abaissement très efficace des températures et atteinte de vitesse de l'air suffisante une majeure partie du temps		

* www.commercialwindows.org (consultation novembre 2014).
Source: Solener, ADEME, 2014.

Si seul un mur ou deux murs adjacents sont exposés à l'extérieur, la circulation de l'air peut néanmoins être améliorée via l'utilisation de murets, en séparant le plus possible les ouvertures si celles-ci sont situées sur le même mur.

Illustration 3.19 : Utilisation de murets pour ventilation

Meilleures performances | Bonnes performances | Mauvaises | Mauvaises

Ouvertures sur le même mur

Ouvertures sur des murs adjacents

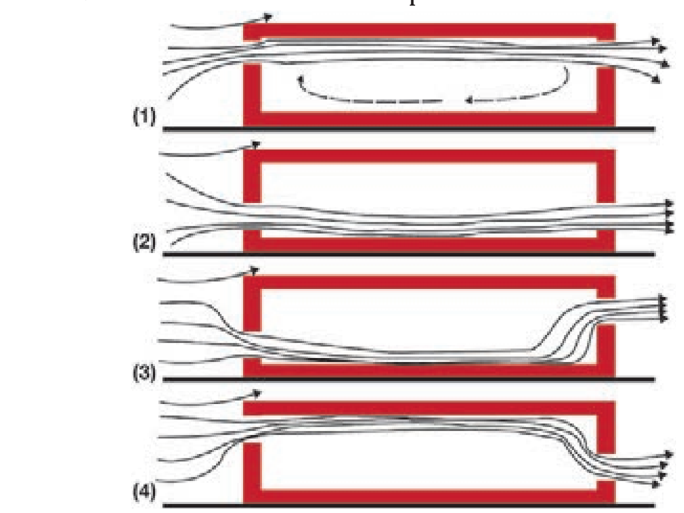
Source : ENERGIES 2050, d'après Brown G.Z. et DeKay M., 2000.

Placement vertical des ouvertures

Le placement et la taille des ouvertures aura un impact important sur l'efficacité d'une stratégie de ventilation transversale et sur les ressentis en termes de confort.

Illustration 3.20 : Circulation de l'air en fonction du placement des ouvertures





Source : Evans, 1980, illustration redessinée par ENERGIES 2050.

Comme le montre cette illustration, le placement de l'ouverture d'entrée au niveau haut (1 et 4) résultera en une circulation de l'air assez pauvre au niveau des occupants, quel que soit l'emplacement de la sortie d'air. Une entrée d'air assez basse et une sortie plus en hauteur (3) reste le meilleur modèle pour une circulation d'air plus uniforme.

D'autres systèmes utiliseront une évacuation d'air par le haut (combinaison avec effet de cheminée) ou un système plus élaboré (illustration ci-dessous).

Illustration 3.21 : Ventilation transversale avec multiples entrées et sorties d'air

Source : ENERGIES 2050 d'après Baker N., p. 97.

3.2.2.2 Taille des ouvertures

Le niveau de circulation d'air et sa vélocité dépendront en grand partie de la taille des ouvertures. L'équation suivante permet de déterminer le niveau de débit d'air :

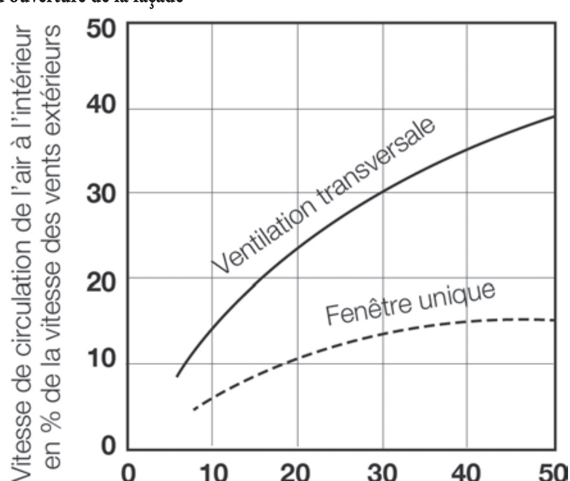
$$(1)\ Q = C_d \,.\, A \,.\, (2(p_t\text{-}p_s)/d)^{1/2}$$

Où,

- Q est le niveau de débit d'air (m^3/s) ;
- C_d est le coefficient de décharge de l'ouverture ;
- A correspond à la taille (m^2) de l'ouverture ;
- p_t est la pression totale à travers l'ouverture (pa) ;
- p_s est la pression de l'espace en aval de l'ouverture (pa) ; et,
- d est la masse volumique de l'air (kg/m^3).

Plus la taille de l'ouverture sera grande, plus la circulation d'air à travers cette ouverture sera élevée. Un autre facteur à considérer est la surface totale des ouvertures (fenêtres ou autres) en relation à la surface de la façade extérieure.

Illustration 3.22 : Relation entre vents intérieurs (en pourcentage des vents extérieurs) et pourcentage d'ouverture de la façade



Source : ENERGIES 2050 d'après Evans, 1980.

De plus grandes ouvertures permettront ainsi un plus grand afflux d'air, avec des vitesses se rapprochant de celles des vents extérieurs. Il est néanmoins important de balancer ces effets en fonction des apports de chaleur potentiels en milieu tropical, avec une température de l'air extérieure plus élevée, et des objectifs de confort olfactif (entrée de polluants) et acoustique.

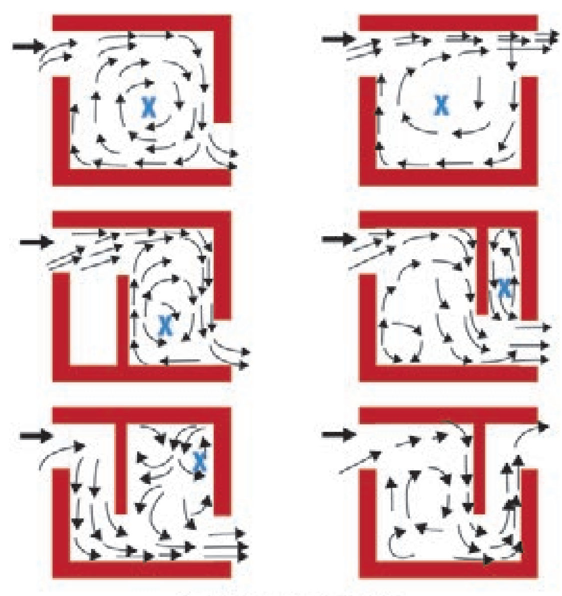
3.2.2.3 Conseils supplémentaires

Organisation des espaces intérieurs

À l'image de la ventilation par effet de cheminée, une bonne ventilation transversale sera facilitée par un espace interne aéré avec peu d'obstructions. L'illustration suivante montre l'effet sur la circulation de l'air d'un mur de partition en fonction de son placement par rapport aux ouvertures.

Il est donc conseillé de minimiser les obstructions à la circulation de l'air et de privilégier des ouvertures décalées et situées sur deux murs se faisant face, ce qui peut être facilité par une forme longue et étroite du bâtiment. À défaut de quoi l'organisation du système de ventilation devra tenir compte de l'impact des différentes obstructions.

Illustration 3.23 : Circulation de l'air dans les espaces intérieurs avec et sans partition, en fonction du placement des ouvertures

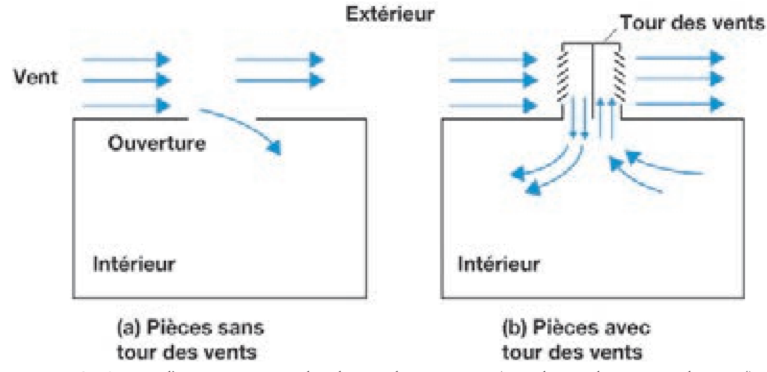


Source : ENERGIES 2050, d'après Givoni B., 1981, p. 303.

Utiliser des éléments architecturaux : exemple des tours du vent

Les tours du vent, ou badgirs, sont un élément architectural visant à capturer les vents passant en hauteur au-dessus du bâtiment pour aérer les espaces intérieurs situés en dessous. Eléments traditionnels de l'architecture perse, ils sont particulièrement recommandés dans les cas où les obstructions à la circulation de l'air au niveau des sols sont nombreuses.

Illustration 3.24 : Circulation des vents avec et sans tour des vents

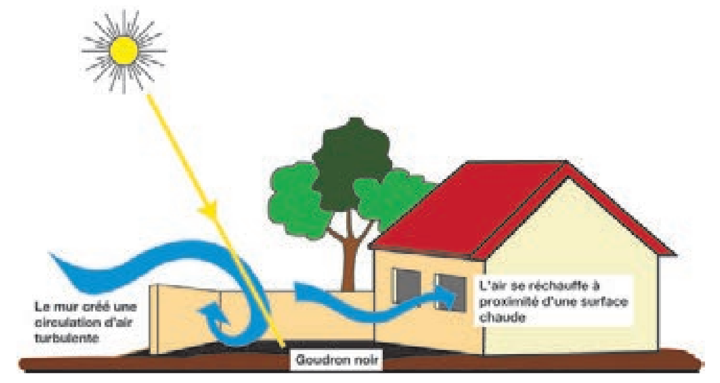


Source : ENERGIES 2050, d'après Université Polytechnique de Hong Kong (consultation du site novembre 2014).

Organisation du site

En milieu tropical, il est critique de contrôler la température de l'air entrant afin d'éviter l'apport de chaleur et d'humidité. L'illustration ci-dessous montre comment une mauvaise organisation des espaces extérieurs peut avoir des conséquences négatives sur la qualité de l'air entrant. Dans ce cas précis, l'air est réchauffé par son interaction avec du tarmac noir avant son entrée dans le bâtiment, alors que de l'herbe ou de la végétation permettraient de réduire ces apports thermiques.

Illustration 3.25 : Réchauffement de l'air entrant via le contact avec une surface chaude

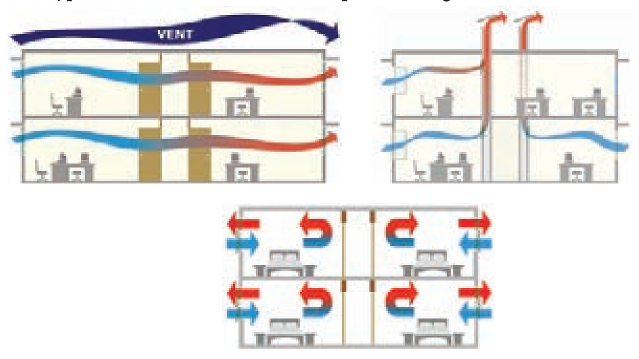


Source : ENERGIES 2050, d'après Baker, 1987.

Ventilation sur plusieurs étages

La ventilation sur plusieurs étages doit suivre les principes énoncés ci-dessus et s'adapter à la physionomie du bâtiment. Elle pourra s'appuyer sur une ventilation transversale par étage (cf. illustration 3.26, à gauche), une évacuation de l'air via un corridor central ou atrium, avec ou sans cheminées solaires (à droite), ou même via un système propre à chaque pièce (en bas). Cette dernière option devra néanmoins être utilisée en dernier recours considérant le rendu assez faible en termes d'efficacité.

Illustration 3.26 : Types de ventilation sur bâtiment de plusieurs étages



Source : Bruxelles environnement, Guide Bâtiment Durable (consultation du site novembre 2014).

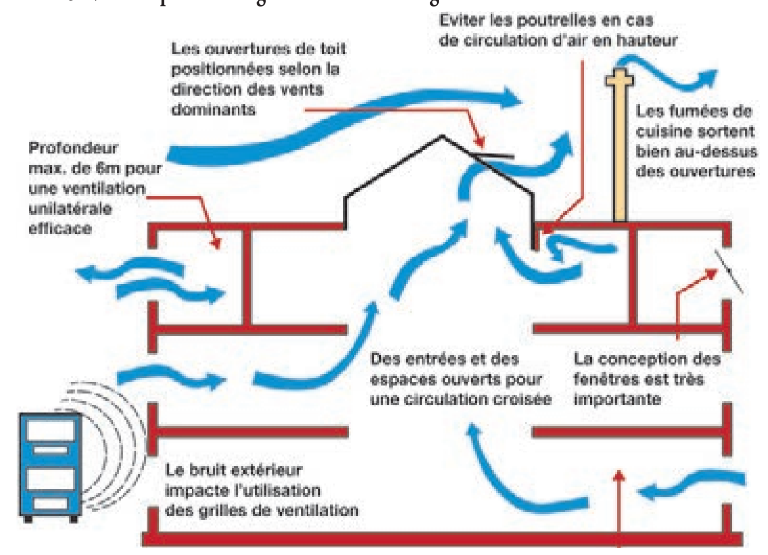
3.2.3 Conseils pratiques

3.2.3.1 Démarches à effectuer

Avant d'entreprendre la conception du système de ventilation, plusieurs étapes sont donc à effectuer :

- Étudier avec attention les caractéristiques des vents, en tenant compte du microclimat local, des obstructions mais également des sources d'air et des pollutions éventuelles (par exemple transports en amont).
- Identifier les possibles besoins de traitements de l'air (retrait de chaleur, des polluants).
- Calculer la circulation de l'air nécessaire pour satisfaire aux objectifs de qualité de l'air et de confort thermique. Bien sélectionner le type de fenêtres et d'ouvertures en conséquence, et utiliser des brasseurs d'air en complément si nécessaire.
- S'assurer de la conformité du bâtiment et limiter les risques notamment en termes de courants d'airs, d'apports thermiques et de confort visuel pour les occupants.
- Orienter le bâtiment pour une exposition maximale aux vents (angle de 0 à 30°), en tenant compte néanmoins des objectifs de confort.

Illustration 3.27 : Exemple de stratégie de ventilation intégrée



Source : ENERGIES 2050, d'après Université De Montfort, 2011.

Dans cette illustration, on peut notamment constater la prise en compte des bruits extérieurs qui peuvent nuire au confort ainsi que des rejets des cuisines, situés en aval des vents et à une hauteur supérieure aux sorties d'air afin d'éviter toute pollution (par exemple odeurs).

Il sera par ailleurs parfois nécessaire d'utiliser des protections telles que des anti-moustiques. Ces protections peuvent ralentir la circulation de l'air dans des proportions pouvant aller jusqu'à 84 %, un facteur dont il faudra donc tenir compte et qu'il faudra intégrer dans la conception[7].

3.2.3.2 Compatibilité avec ventilation mécanique contrôlée (VMC)

En environnement urbain dense il est parfois compliqué de conserver les fenêtres ouvertes et donc de ventiler le bâtiment, notamment pour des raisons de pollutions et de bruits. L'utilisation de ventilateurs électriques ou d'une VMC peut alors être un bon complément aux stratégies naturelles. Le choix des ventilateurs devra se faire en fonction des besoins, notamment du temps d'utilisation escompté et des dimensions de l'édifice, ainsi que de leur efficacité énergétique. Ils peuvent être mobiles ou fixés aux plafonds ou aux murs (attention cependant aux courants d'airs provoqués).

Tableau 3.4 : Conseils pratiques concernant les ventilateurs de plafond

Conseils pour brasseurs plafond	
Diamètre des pâles en cm	Supérieure à 140 cm, moins (80 cm min.) si pièces ≤ 20m²*
Vitesses	3 minimum
Consommation en veille	Inférieure à 0,5 W
Acoustique	Niveau sonore faible
Puissance absorbée max	50 à 80 W par brasseur
Hauteur entre pâles et plafond	Minimum 30 à 50 cm
Nombre de brasseurs d'air	1 tous les 10-12m², avec un nombre pair sauf pour petites salles (1 brasseur)
Commande	Manuelle ou gérée par sonde de présence

* www.specialistes-air.com (consultation novembre 2014).
Source : Solener, 2014a.

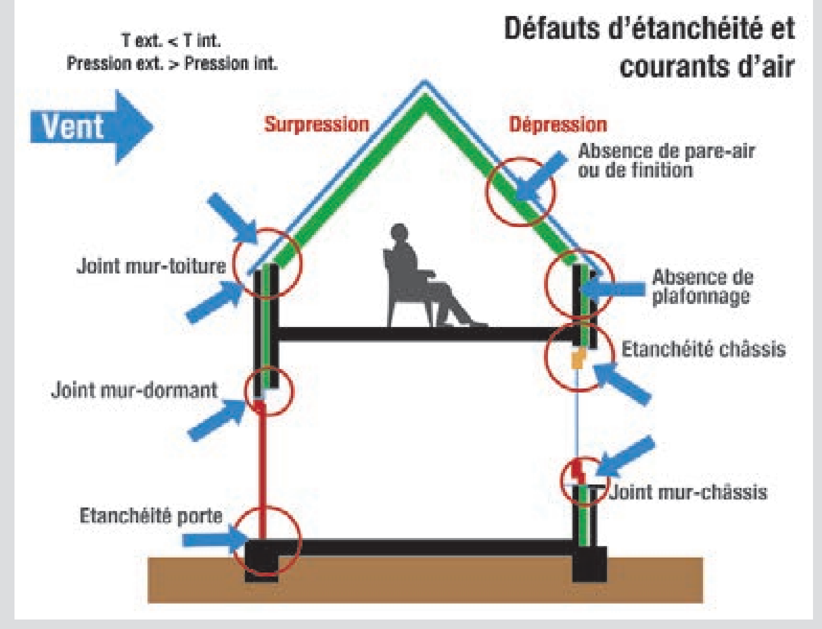
Encadré 3.2 : Notes sur les infiltrations d'air

Une bonne maîtrise des infiltrations d'air à travers le bâtiment est nécessaire pour une ventilation naturelle efficiente mais également et surtout en bâtiments climatisés. Ces infiltrations peuvent perturber la circulation de l'air et avoir des conséquences néfastes (d'autant plus en bâtiment climatisé) en termes d'apports de chaleur et de pollutions diverses.

7. Baker, 1987, p. 106.

Les fuites d'air peuvent venir notamment des liaisons entre façades et planchers, des menuiseries extérieures, des équipements électriques (exemple : prises de courant sur parois extérieures), de trappes, des portes ou d'éléments traversant les parois. À titre d'exemple, une porte courante pourra avoir une perméabilité 6 fois supérieure à celle d'une porte avec joint d'étanchéité (Solener, 2014a).

Illustration 3.28 : Exemples typiques de défauts d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment



Source : IBGE, 2010.

Il conviendra donc de limiter ces fuites dans la conception du bâtiment, en adoptant par exemple des matériaux plus hermétiques (se référer notamment au classement constructeur AEV, Air Eau Vent, des matériaux).

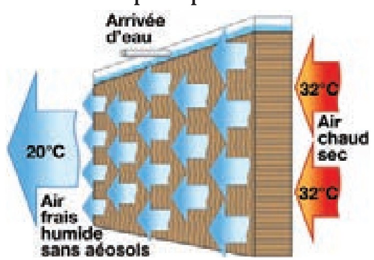
3.3 Stratégies de refroidissement naturel

Nous avons déjà évoqué auparavant que la ventilation peut servir dans des stratégies de refroidissement naturel, notamment via une vitesse de circulation de l'air assez élevée dans les limites du confort des occupants. Néanmoins d'autres méthodes peuvent permettre de refroidir les espaces intérieurs sans usage de l'air conditionné.

3.3.1 Refroidissement par évaporation

Le refroidissement par évaporation est un phénomène physique dans lequel l'évaporation d'un liquide dans l'air ambiant le refroidit. Il est particulièrement utilisé dans les climats ou les périodes de l'année plutôt secs. L'utilisation dans le bâtiment peut être combinée aux principes de ventilation par le biais du système illustré ci-dessous :

Illustration 3.29 : Principe d'un refroidisseur par évaporation

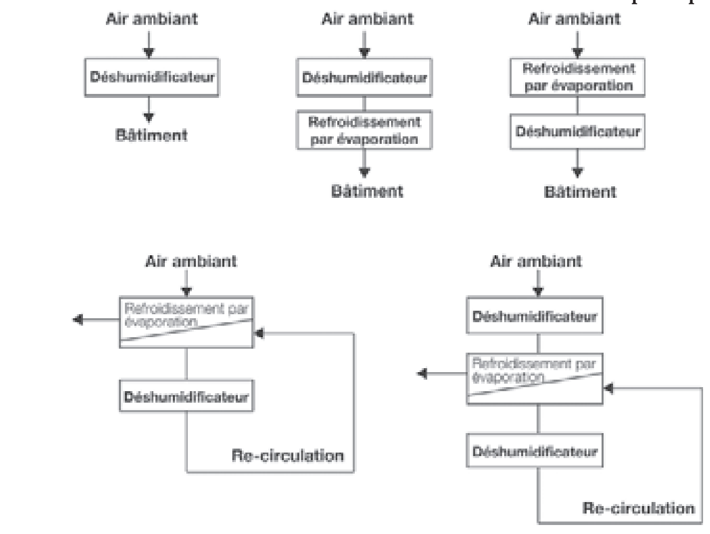


Source : http://www.jshumidificateurs.fr (consultation novembre 2014).

L'air entrant passe au travers d'un média imbibé d'eau qui le refroidit avant son entrée dans le bâtiment. Ce média doit donc être installé au niveau de l'entrée d'air prévue par le système de ventilation, où la circulation de l'air peut être aidée par un système mécanique.

Une des limites de ce système est qu'il ne fonctionne pas lorsque l'air est déjà chargé d'humidité, comme c'est le cas en climat tropical chaud et humide. L'utilisation en combinaison d'un déshumidificateur peut permettre d'accroître l'efficacité du système en diminuant l'humidité relative de l'air entrant avant son passage via le média.

Illustration 3.30 : Utilisation combinée de déshumidificateur et de refroidissement par évaporation

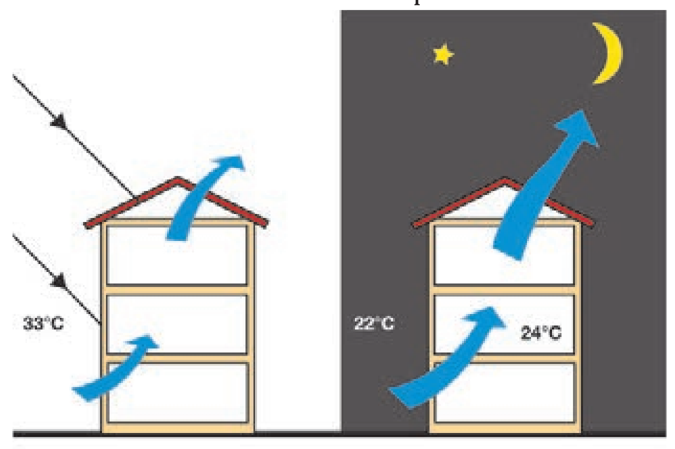


Source : ENERGIES 2050, d'après Baker N., 1987.

Ventilation naturelle nocturne

Une flexibilité importante des systèmes de ventilation, qui permet une arrivée d'air plus élevée durant la nuit lorsque l'air extérieur est plus frais, peut être une alternative possible pour refroidir les espaces internes du bâtiment.

Illustration 3.31 : Ventilation différenciée en fonction des températures



Source : ENERGIES 2050, d'après Baker, 1987, p. 106.

Le tableau suivant donne une indication des différentes considérations entrant dans le choix d'une climatisation basée sur la ventilation naturelle en climat tropical humide.

Tableau 3.5 : Considérations pour systèmes de climatisation naturelle basés sur la ventilation

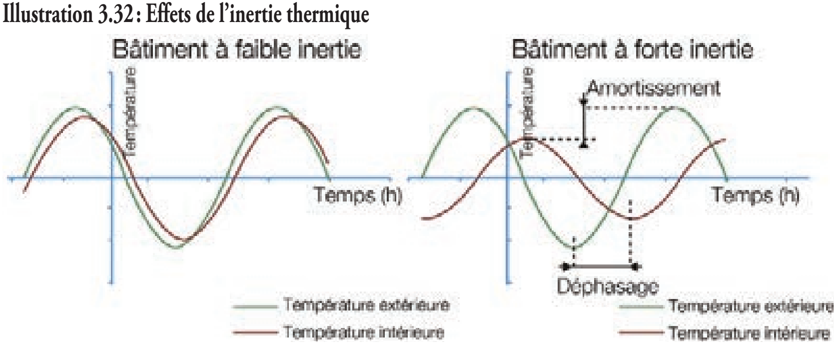
Site	Conditions favorables pour refroidissement naturel	Conditions acceptables/améliorations possibles
Environnement construit	• Pas d'obstacles à la circulation des vents • Possibilité de capter les vents secondaires • Rugosité et ombrage environnants	• Si obstacles, optimiser par une étude aéraulique à l'échelle de la parcelle • Combinaison avec brasseurs d'air si nécessaire
Environnement acoustique	Zone calme	Protection acoustique si zone moyennement bruyante, dépendant de l'usage du bâtiment (hôpital, domestique, bureau)
Lutte contre îlot de chaleur urbain	Possible utilisation de végétation à haute tige	Végétalisation des parois
Qualité sanitaire (ex. insectes ou moustiques)	• Pas d'eau stagnante dans le voisinage • Lutte contre l'humidité avec drainage au pied des façades, végétation	Moustiquaires (a cependant un impact sur la ventilation du bâtiment)
Sécurité	Zone tranquille ou non accessible par l'extérieur	Grilles fixes centrales, fermetures adaptées, jalousies résistantes à l'effraction

Source : Solener, ADEME, 2014.

Utilisation de l'inertie thermique

L'utilisation d'une forte inertie thermique est applicable principalement pour les climats où les variations de températures journalières sont élevées. Le bâtiment va absorber la chaleur en journée avec un relâchement déphasé permettant ainsi un écrêtage des températures minimales et maximales (amortissement) et un meilleur contrôle du climat intérieur (températures plus fraîches qu'à l'extérieur durant la journée, plus chaudes la nuit).

Illustration 3.32 : Effets de l'inertie thermique

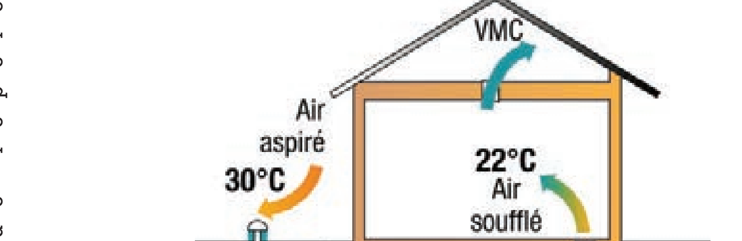


Source : Surya consultants, via Eti constructions (consultation du site novembre 2014), illustration redessinée par ENERGIES 2050.

Puits canadien

L'utilisation d'un puits canadien s'avérera également bénéfique dans les climats où l'amplitude de variations des températures journalières est élevée. Ce système consiste à faire circuler l'air entrant dans un réseau de tuyauteries à 1 ou 2 m de profondeur, où la température des sols varie peu. L'échange thermique par convection permet ainsi de rafraîchir l'air (ou de le réchauffer la nuit) avant son entrée dans le bâtiment.

Illustration 3.33 : Puits canadien



Source : www.credit-impot.fr (consultation novembre 2014).

Références

Aynsley R., 2007. *Natural ventilation in passive design, BEDP Environment Design Guide, BEDP, Australia,* disponible via http://www.environmentdesignguide.com.au/media/TEC02.pdf.

Baker N.V., 1987. *Passive and Low Energy Building Design For Tropical Island Climates*, Commonwealth Science Council, ECD Partnership, Londres.

BRE, 1997. *BICEPS module. Ventilation, Energy Efficiency and Indoor Air Quality*, HMSO, Londres.

Brown G.Z. et DeKay M., 2000. *Sun, Wind and Light : Architectural Design Strategies*, 2nd edition, Wiley, Royaume-Uni.

CETE de Lyon, 2006. *Perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments, généralités et sensibilisation,* CETE de Lyon, L'isle d'Abeau, France, disponible via http://www.cete-lyon.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Generalites_et_sensibilisation_v_2-4_cle1f1de9.pdf.

DETR CIBSE, 1998. *Good practice guide 237, Natural ventilation in non-domestic buildings – a guide for designers, developers and owners*, DETR CIBSE, Londres.

Evans M., 1980. *Housing Climate and Comfort,* Architectural Press, Londres.

Givoni B., 1981. *Man, Climate and Architecture*, Van Nostrand Reinhold, New York, p. 303.

Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE), 2010. *Guide pratique pour la construction et la rénovation de petits bâtiments*, IBGE, Bruxelles, Belgique, disponible via http://app.bruxellesenvironnement.be/guide_batiment_durable/docs/ENE10_FR.pdf.

Izudinshah Abd. Wahab, Lokman Hakim Ismail, 2011. *Natural Ventilation Approach in Designing Urban Tropical House*, Département d'Ingénierie en Construction et Architecture, Université Tun Hussein Onn Malaysia, disponible via http://eprints.uthm.edu.my/2538/1/Natural_Ventilation_Approach_in_Designing_Urban_Tropical_House.pdf.

Khedari, J, Yamtraipat, N, Pratintong, N & Hinrunlabbh, J, 2000. *Thailand Ventilation Comfort Chart,* Energy and Buildings, Vol 32, pp. 245-249.

Solener, 2014a. *L'architecture bioclimatique en climat tropical humide : Conception thermique,* Module pour l'Initiative pour la Promotion des Villes Durables en Afrique, Octobre 2014, Lomé, Togo.

Solener, 2014b. *Le confort hygrométrique et climats en Afrique de l'Ouest,* Module pour l'Initiative pour la Promotion des Villes Durables en Afrique, octobre 2014, Lomé, Togo.

Solener, ADEME, 2014. *Guide climatisation tertiaire en Guyane,* ADEME Guyane (version d'octobre 2013).

Université De Montfort, 2011. *Energy in Buildings*, MSc climate change and sustainable development, Leicester, Royaume-Uni.

Wei Fang, 2003. *Environmental Engineering to reduce Heat stress in Dairy Cattle*, Université Nationale de Taïwan, Centre Technologique Nourriture et Fertilisant, disponible via http://www.agnet.org/library.php?func=view&style=&type_id=5&id=20110801163637&print=1.

Sites internet *(dernière consultation en janvier 2015)* et sources additionnelles des illustrations

Architecture.com : http://www.architecture.com/Images/RIBAHoldings/PolicyAndInternationalRelations/SustainabilityHub/1-2-1-2-Stackventilation/1-2-1-2-stack-ventilation-volumeflowcalculator.gif

Autodesk Sustainability Workshop : http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/

Bruxelles environnement, Guide Bâtiment Durable : http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be

Université Catholique de Louvain (Cellule de Recherche en Architecture et Climat), *Site Energie +* : http://www.energieplus-lesite.be

Commercial Windows : www.commercialwindows.org

Eti construction : http://publications.eti-construction.fr/fiches/performance-energetique-des-batiments-a-renover-dt23/diagnostiquer-l-inertie-thermique-d-un-batiment-0305/

Heimler : http://heimlerheatcoolplumb.com/wet-basement_crawlspace.php

JS Humidificateurs : www.jshumidificateurs.fr

Outils Solaires : http://outilssolaires.com

« Renewable Energy for the Poor Man » : http://poormanguides.blogspot.fr/2009/06/solar-air-conditioning.html

Spécialistes Air : http://www.specialistes-air.com/choisir-ventilateur-plafond.html#ventilateur-plafond

Université Polytechnique de Hong Kong, Département d'Ingénierie des Services du Bâtiment : http://www.bse.polyu.edu.hk/Staff/becmmak/CFD-windcatcher.html

Chapitre 4
Éclairage naturel et intégration avec éclairage artificiel

Intégrer l'éclairage naturel dans la conception du bâtiment est une étape importante pouvant permettre de réduire la facture énergétique et d'assurer un meilleur confort visuel pour les occupants, la lumière naturelle présentant notamment d'excellents rendus et températures de couleur. Nous avons déjà rappelé (Chapitre 2) certains principes physiques devant être pris en considération, tels que la distribution de la luminance et le facteur en lumière du jour. Nous allons voir ci-dessous comment ces principes peuvent être utilisés dans la conception du bâtiment.

4.1 Modèle ciel couvert de la Commission Internationale de l'éclairage

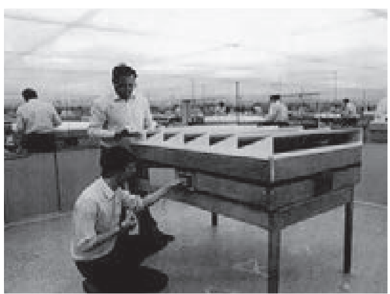
Le niveau d'éclairage naturel d'un site donné va dépendre de deux facteurs : le rayonnement du soleil direct et réfléchi d'une part, et la lumière diffuse du ciel d'autre part. La meilleure stratégie consiste néanmoins à utiliser la composante diffuse, qui, bien qu'étant moins puissante que la composante directe du soleil, présente un rendement lumineux (lumens par Watt) plus élevé et limite les risques d'éblouissement.

Cette composante peut être anticipée via l'utilisation de modèles numériques, dont le plus courant est le modèle ciel couvert (Standard Overcast Sky Model) de la Commission Internationale de l'éclairage (CIE).

Ce modèle suppose une distribution uniforme de la luminance[1] à travers un ciel couvert (nuageux). Les valeurs de luminances peuvent être basées sur des simulations numériques, pratiques (illustration ci-dessous) ou sur des relevés sur une période représentative.

1. Flux lumineux réfléchi rapporté à l'aire de la surface réfléchissante, en candela par m², voir chapitre 2.

Illustration 4.1 : Reproduction de l'éclairement du ciel en utilisant des boites équipées de miroirs et des lampes tubulaires fluorescentes



Source : BRE, 1994.

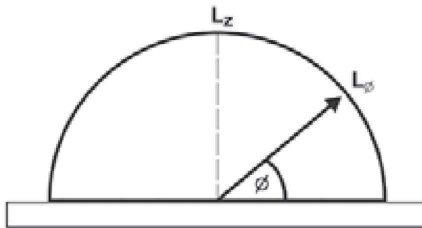
La distribution de la luminance à travers le ciel peut ainsi être calculée en utilisant l'équation ci-dessous :

$$(1)\ L_\phi = \frac{L_z(1+2\sin\phi)}{3}$$

Où,

- L_ϕ = luminance (candela par m²) à l'angle ϕ au-dessus de l'horizon ; et
- Lz = luminance au zénith (illustration ci-dessous).

Illustration 4.2 : Distribution angulaire de la luminance dans le modèle ciel couvert



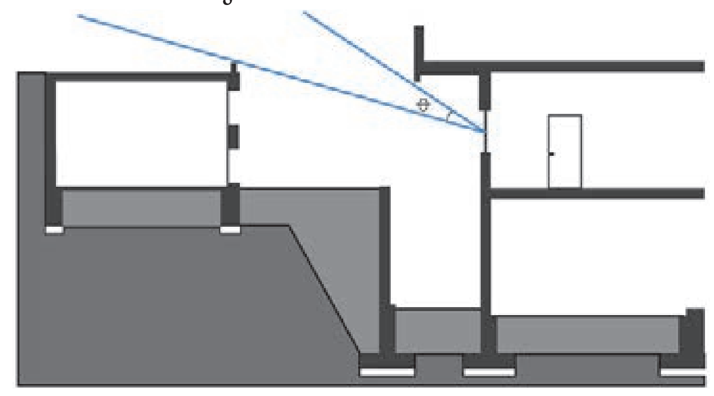
Source : ENERGIES 2050, d'après Université De Montfort, 2011.

Selon ce modèle, la luminance s'accroît donc à mesure que l'on s'éloigne de la ligne d'horizon et que l'on se rapproche du zénith. En suivant l'équation (1), on peut ainsi déterminer que la luminance au zénith sera trois fois supérieure à celle de l'horizon (où ϕ=0 donc sinϕ=0). Ce ratio s'accroît généralement avec la présence de différentes obstructions telles que la végétation, la topographie ou l'urbanisation.

4.2 Application au bâtiment : évaluation de l’angle de ciel visible et facteur de lumière du jour

Pour estimer la luminosité reçue dans une pièce du bâtiment, il est donc nécessaire de déterminer l’angle de ciel visible (θ) depuis la fenêtre ou l’ouverture dans la façade.

Illustration 4.3 : Évaluation de l’angle de ciel visible



Source : ENERGIES 2050, d’après www.educate-sustainability.eu (consultation novembre 2014).

Pour un nouveau bâtiment, il est généralement utile de faire appel à des logiciels permettant d’intégrer les différentes obstructions locales à la lumière. Par ailleurs, si l’emplacement de l’ouverture n’a pas encore été décidé, il est conseillé de prendre les mesures directement depuis le centre de la façade extérieure.

L’évaluation de l’angle de ciel visible est particulièrement importante pour calculer le facteur de lumière du jour moyen, qui comme indiqué dans le chapitre 2, peut être estimé en suivant l’équation suivante[2] :

$$(2)\ FLJ_{moy} = Sf \,.\, TL \,.\, a / (St \,.\, (1 - R^2))$$

Où,

- FLJ_{moy} = rapport entre l’éclairement naturel intérieur moyen (en lux) au niveau du plan de travail, rapporté au niveau d’éclairement par ciel couvert sur une surface parallèle à l’extérieur, exprimé en pourcentage (voir chapitre 2 pour plus de détails) ;
- Sf = surface nette de vitrage (ouverture de baies moins 10 % pour les châssis) en m^2 ;
- TL = facteur de transmission lumineuse du vitrage ;
- a = angle du ciel visible depuis la fenêtre, exprimé en degrés ;
- St = surface totale de toutes les parois du local considéré en m^2 ; et
- R = facteur de réflexion moyen des parois.

2. Université Catholique de Louvain, Energie + (consultation novembre 2014).

Il est possible de voir, à travers cette équation, que la taille des ouvertures Sf, le type de vitrage ou encore les coefficients de réflexion moyens peuvent être modifiés afin d'atteindre la valeur de FLJ_{moy} recherchée. L'objectif sera différent selon l'utilisation du bâtiment et le site mais des valeurs minimums allant de 1 à 2 % sont généralement recommandées.

Tableau 4.1 : Valeurs recommandées des FLJ_{moy} selon les bâtiments et les activités (Royaume-Uni)

Type de bâtiment/utilisation	FLJ_{moy} recommandés
Chambre	0,5 % aux ¾ de la profondeur de la chambre
Bureaux	2 % minimum
Salle de classe	2 % minimum
Cuisine	2 % à la moitié de la profondeur de la cuisine
Salon	1 % à la moitié de la profondeur du salon
Usine	5 % minimum
Église	1 % minimum

Source : Université De Montfort, 2011.

Il conviendra néanmoins de tenir compte également de la répartition de l'éclairement dans la pièce afin de limiter les risques d'inconfort visuel.

Tableau 4.2 : Exemples de niveaux d'éclairement à maintenir au niveau de la zone d'activité et au niveau des zones environnantes, bâtiments non domestiques (normes européennes)

Type d'activité	Éclairement conseillé	Éclairement des zones environnantes à la zone d'activité	Différence max.
Écriture	500 lux	300 lux	200 lux
Dessin industriel	750 lux	500 lux	250 lux
Salle de réunion	500 lux	300 lux	200 lux
Réception	300 lux	200 lux	100 lux
Archives	200 lux	200 lux	0
Classement	300 lux	200 lux	100 lux

Source : Sonepar (sans date).

Selon ces normes, pour une luminance sur surface parallèle au plan de travail à l'extérieur estimée par exemple à 25000 lux, les Facteurs de Lumière du Jour à obtenir seront donc de 2 % en zones d'écriture et salles de réunion et de 3 % en zones de dessin industriel.

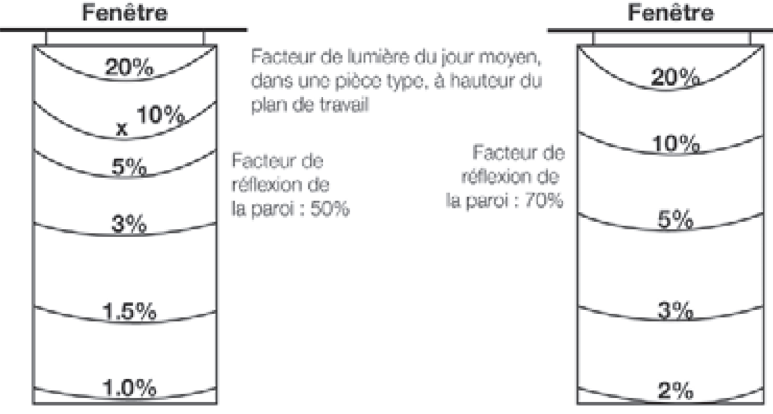
4.3 Facteurs impactant le FLJ_{moy}

Une fois l'objectif fixé, il sera possible d'influer sur le FLJ_{moy} de diverses manières. Celui-ci dépend, pour rappel, de trois composantes : l'éclairage direct du ciel, celui réfléchi par les objets et immeubles extérieurs et celui réfléchi par des composants intérieurs.

4.3.1 Réflexion des parois

L'utilisation de surfaces à plus haut coefficient de réflexion peut permettre d'obtenir une plus grande luminosité et une meilleure répartition de la lumière naturelle dans une pièce. L'illustration ci-dessous montre une simulation de l'impact sur les FLJ d'un accroissement du coefficient de réflexion des murs intérieurs, de 50 à 70 %.


Illustration 4.4 : Effet des parois sur le facteur de lumière du jour



Source : ENERGIES 2050, d'après Smith B.J. et al., 1982, p. 406.

On peut ainsi constater sur le schéma de droite (coefficient de réflexion plus élevé) une meilleure répartition de la lumière avec un gradient moins prononcé et une luminosité plus élevée à mesure que l'on se rapproche du fond de la pièce.

4.3.2 Choix du type de fenêtres

Le type de fenêtres sélectionné, et notamment leur facteur de transmission lumineuse, aura un impact sur la quantité de lumière reçue à l'intérieur du bâtiment. Des coefficients de correction sur la quantité de lumière entrante doivent donc être appliqués (pris en compte via TL dans l'équation 2), ceux-ci variant en fonction du type de matériel (Tableau ci-après).

Si l'utilisation de double vitrage ou de vitrages teintés est parfois nécessaire d'un point de vue du confort thermique et visuel, cela devra donc être balancé avec les objectifs d'éclairage naturel du bâtiment.

Tableau 4.3 : Exemple de coefficients de correction en fonction du type de matériel

Matériel	Facteur de correction (TL)
Vitre transparente – 6mm	0.8
Vitre teintée en gris – 6mm	0.39
Vitre teintée en vert – 6mm	0.66
Vitre à fort coefficient de réflexion – 6mm	0.18
Double vitrage vitres transparentes – 6+6 mm	0.65
Double vitrage vitre réfléchissante et vitre transparente – 6+6 mm	0.26
Double vitrage vitre fortement réfléchissante et vitre transparente – 6+6 mm	0.15

Source : Université De Montfort, 2011.

Taille des fenêtres et ouvertures

La taille des fenêtres aura une grande influence sur la quantité de lumière entrante dans la pièce. Plus celle-ci est élevée, plus l'entrée de lumière naturelle sera importante. Sans tenir compte de l'impact sur la thermie du bâtiment, une méthode permettant de déterminer la taille optimale d'une ouverture consiste à utiliser l'équation suivante[3] :

$$(3)\ WWR > 0{,}088 FLJcTL * (90°/\phi)$$

Où,

- WWR (Window to Wall Ratio) = ratio de la taille des fenêtres (hors cadres et meneaux) rapportée à la surface de la paroi extérieure ;
- FLJc = facteur de lumière du jour ciblé ;
- TL = transmittance visuelle du vitrage ; et
- ϕ est l'angle de ciel visible.

En réalité, il conviendra de limiter la taille des ouvertures en fonction notamment des objectifs de confort des occupants et de leur intimité.

Encadré 4.1 : Limites du FLJ_{moy}

L'utilisation du Facteur de lumière du jour moyen présente certaines limites notamment pour les pièces ayant une grande profondeur, ne tenant pas compte :

- de la répartition des facteurs de lumière du jour le long de la pièce : même en atteignant le FLJ_{moy} ciblé, la luminosité près des ouvertures peut rester trop élevée tout en étant trop basse dans d'autres parties de la pièce, avec des conséquences négatives en termes de confort visuel ;

3. Université de Harvard, 2009, p. 11.

- du degré de pénétration de la lumière du ciel dans la pièce, certaines zones pouvant ne pas recevoir d'éclairage direct ;
- de l'étendue de l'espace où la lumière du jour est utilisable.

Il est possible, par exemple, d'évaluer la profondeur maximale d'une pièce (purement du point de vue de l'éclairage naturel) en fonction de la hauteur des fenêtres, grâce à l'équation suivante[a] :

$$(4)\ PL = \{2/(1-R_{MOY})\} / \{(1/w)+ 1/h\}$$

Où,

- PL = profondeur maximale (m) ;
- R_{MOY} = la réflectance moyenne de la surface (sans dimension) ;
- w = la longueur de la chambre (m) ; et
- h = hauteur mesurée depuis le haut de la fenêtre (m).

La surface de vitrage nette (A_{VIT}) requise (en m²) selon l'espace à éclairer peut alors être déterminée via l'équation[b] :

$$(5)\ A_{VIT} = [FLJc*2A_{tot}(1-R_{MOY})]/(TL*\ \phi).$$

Où,

- A_{tot} = aire totale des espaces intérieurs incluant les fenêtres, en m² ;
- TL = transmittance visuelle du vitrage ; et
- ϕ = angle de ciel visible (°).

a. Université de Harvard, 2009.
b. Université de Harvard, 2009.

4.4 Méthodes d'amélioration de la répartition de la lumière

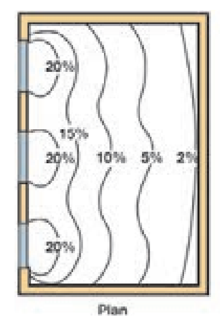
Afin d'obtenir un meilleur rendu dans l'éclairage naturel d'une pièce, différentes solutions existent.

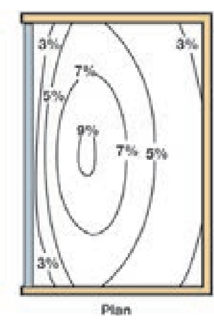
4.4.1 Changer la disposition des fenêtres

En modifiant la position des fenêtres, il est possible d'obtenir de meilleurs rendus sans augmenter la taille des ouvertures. L'illustration ci-dessous montre l'évolution des facteurs de lumière du jour au sein d'une pièce en fonction de l'utilisation de larges

fenêtres latérales (à gauche) ou de la mise en place d'une fenêtre de toit ou d'un puits de lumière de dimension inférieure (à droite) :

Illustration 4.5 : Simulation de répartition des facteurs de lumière du jour en fonction de deux types d'ouvertures





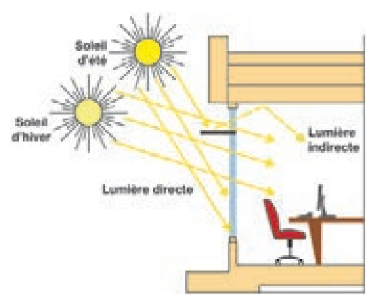
Source : ENERGIES 2050, d'après Smith B.J. et al., 1982, p. 371.

Le second modèle apporte une bien meilleure répartition et surtout une amplitude moins large (6 % contre 18 %) entre les zones les moins éclairées et celles les plus éclairées. Cela permet de réduire les risques d'inconforts visuels et d'éblouissement, et d'agrandir la zone d'éclairement utile pour des activités diverses, malgré une luminosité globale plus faible. Cette flexibilité dans le choix des ouvertures peut aussi permettre une meilleure intégration de l'éclairage naturel avec les objectifs de confort thermique et de ventilation naturelle.

4.4.2 Utiliser des étagères à lumière

Les étagères à lumière (plateaux couverts de film réfléchissant comme l'aluminium) sont une solution couramment recommandée pour faciliter la pénétration de lumière au sein d'une pièce. Ce système doit dans l'idéal être conçu pour obtenir une meilleure distribution de la lumière naturelle et protéger contre l'éblouissement direct. L'étagère peut être installée aussi bien sur l'extérieur que l'intérieur, ou à cheval entre les deux rebords d'une fenêtre.

Illustration 4.6 : Étagère à lumière



Source : ENERGIES 2050, d'après le site McGraw Hill Construction Continuing Education (consultation novembre 2014).

À noter que l'efficacité des étagères à lumière dépendra également des coefficients de réflexion des surfaces intérieures, notamment au niveau du plafond. La largeur et l'emplacement des étagères doivent par ailleurs être étudiés avec précaution afin qu'elles puissent, entre autres, limiter les risques d'éblouissement sans bloquer la vue. Il est possible d'ajuster leur taille et leur inclinaison afin d'obtenir un meilleur rendu, ou d'utiliser certaines alternatives comme des stores à lamelles verticales réfléchissantes. En milieu tropical, les étagères à lumière auront enfin une efficacité réduite sur les façades Est et Ouest en raison de l'angle d'incidence plus plat du soleil avec ces façades.

Encadré 4.2 : Études des effets des étagères à lumière à Dhaka, Bangladesh

Dans une simulation sur l'efficacité de ces outils en fonction de la hauteur à laquelle ils sont placés dans un bâtiment à Dhaka, au Bangladesh[a], il a été constaté une réduction globale dans les valeurs de luminances maximums et minimums reçues au sein de la pièce, comme le montre le tableau suivant :

Tableau 4.4 : Évaluation de l'impact des étagères à lumière en fonction de la hauteur à laquelle elles sont installées, bâtiment à Dhaka, au Bangladesh

Hauteur des étagères en mètres	Éclairement maximum en lux	Éclairage moyen en lux	Nombre de points d'analyse avec valeurs supérieures à 300 lux (sur 83)	Nombre de points d'analyse avec valeurs entre 300 et 900 lux (sur 83 au total)
Aucune étagère	2 600	650	40	22
1,50	1 700	466	39	22
1,75	1 400	370	39	26
2	1 300	315	37	35
2,25	1 500	367	34	22
2,50	1 700	422	31	15
2,75	2 000	478	30	13

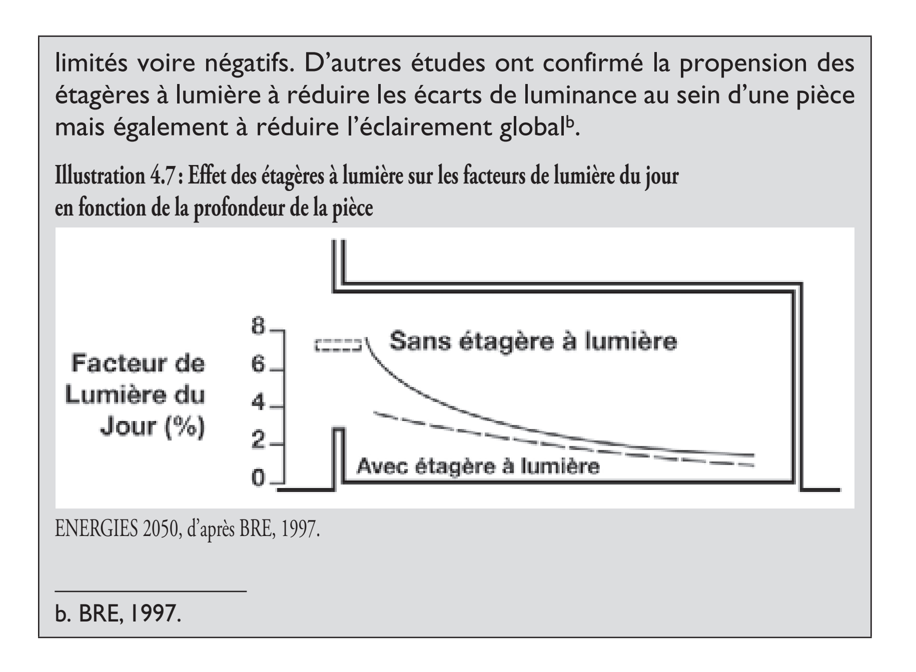
Source : Ashikur Rahman et al., 2009.

Dans cette étude, une meilleure répartition de la lumière a effectivement été obtenue avec des étagères placées à 2 mètres de hauteur. Le niveau de luminance recherché (300 à 900 lux selon leurs standards) a ainsi été mesuré en 35 points de la pièce contre seulement 22 sur 83 sans étagères. La plupart des autres niveaux ont cependant montré des résultats

a. Ashikur Rahman et al., 2009.

limités voire négatifs. D'autres études ont confirmé la propension des étagères à lumière à réduire les écarts de luminance au sein d'une pièce mais également à réduire l'éclairement global[b].

Illustration 4.7 : Effet des étagères à lumière sur les facteurs de lumière du jour en fonction de la profondeur de la pièce



ENERGIES 2050, d'après BRE, 1997.

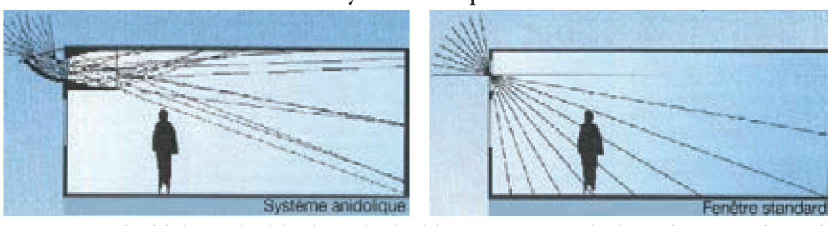
b. BRE, 1997.

4.4.3 Autres éléments intégrés dans la structure du bâtiment

D'autres solutions peuvent être également intégrées dans la structure même du bâtiment, telles que les atriums, les puits de lumière ou l'utilisation d'un système anidolique au niveau du plafond ou des parois. Les apports solaires liés à ces systèmes pourront néanmoins être conséquents et devront être pris en compte.

Un système anidolique utilise des réflecteurs spéculaires courbes afin de profiter de la lumière diffuse du ciel, ce qui peut permettre une augmentation des FLJ y compris dans les profondeurs de la pièce (illustration 4.8).[4] Une toiture voûtée permettra finalement d'annuler l'effet directif de la lumière (illustration 4.9).

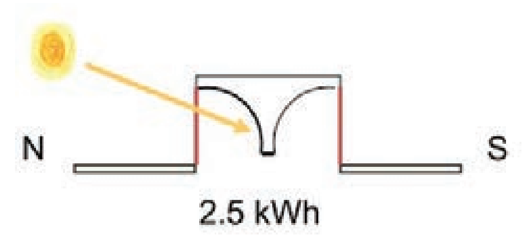
Illustration 4.8 : Effet de l'utilisation d'un système anidolique



Source : CERN solar club, http://solar-club.web.cern.ch/solar-club/Textes/SEV/sev1701.html (consultation novembre 2014).

4. Courret G. et al.

Illustration 4.9 : Effet directif annulé par toiture voûtée

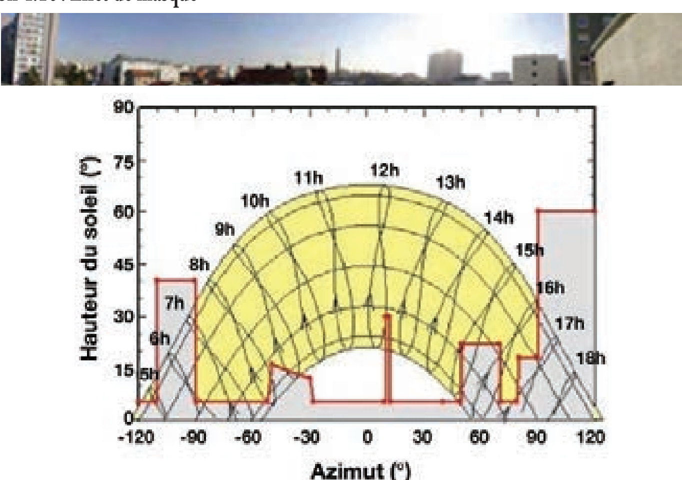


Source : Solener, 2014.

4.5 Masques solaires et apports thermiques

L'utilisation d'un diagramme solaire (voir Chapitre 1) peut permettre de mesurer l'impact direct des rayonnements du soleil sur les fenêtres et ouvertures. En climat tropical, cet impact résultera très souvent dans des apports de chaleur non désirés et un risque d'éblouissement (façades Est et Ouest particulièrement). L'objectif principal sera donc moins d'intégrer ces rayonnements directs dans l'éclairage naturel que de s'en protéger au travers de moyens divers : rideaux, stores, volets, miroirs, fenêtres teintées, avant-toits, ou encore étagères à lumière. Afin de mieux anticiper ces rayonnements, le diagramme solaire peut par ailleurs être combiné avec un relevé de masque de l'environnement immédiat, tel qu'illustré ci-dessous.

Illustration 4.10 : Effet de masque



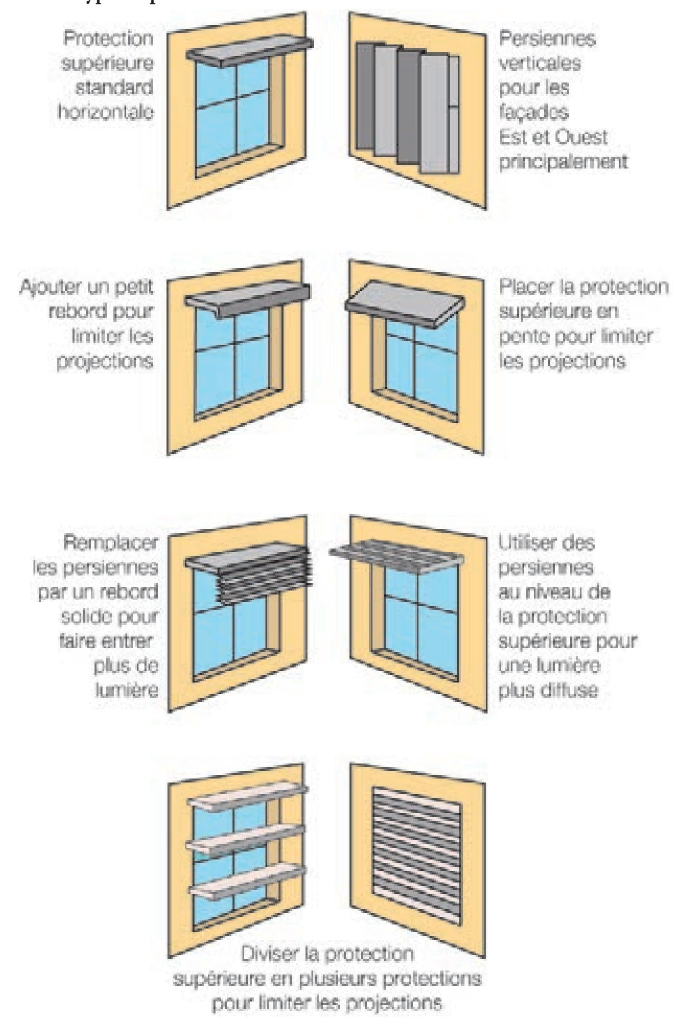
Source : ENERGIES 2050, d'après www.energies-eco-renouvelables.fr (consultation novembre 2014).

4.5.1 Protections extérieures

Les apports d'énergie solaire sont généralement mieux contrôlés via l'utilisation de protections extérieures au niveau des fenêtres et des parois. Ces protections peuvent par

exemple prendre la forme de simples surplombs (à gauche sur l'illustration) plus ou moins modulables et inclinables selon les objectifs, des persiennes verticales ou horizontales (centre) ou une combinaison des deux. Il est également important de prendre en considération l'isolation de ces éléments afin d'éviter qu'ils ne se réchauffent et transmettent cette chaleur vers le vitrage et l'intérieur du bâtiment.

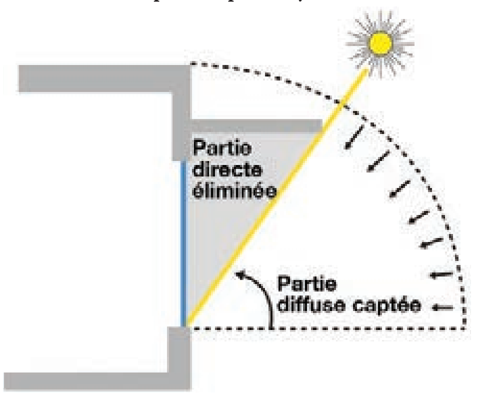
Illustration 4.11 : Types de protections extérieures des fenêtres



Source : ENERGIES 2050, d'après Chang S. et Krueger B., 2008.

En régions tropicales et avec une conception réalisée en fonction des trajectoires du soleil, une préférence devra être donnée aux protections en surplomb ou auvent sur les façades exposées au Nord et au Sud, et éventuellement aux protections totales style persiennes sur les façades Est et Ouest, même si ces protections ne permettent pas l'entrée du flux diffus.

Illustration 4.12 : Utilisation d'un auvent pour bloquer le rayonnement direct



Source : Solener, ADEME, 2014, illustration redessinée par ENERGIES 2050.

4.5.2 Protections intérieures et fenêtres

Les protections intérieures comprennent les rideaux plus ou moins opaques, les stores enroulables, plissés, vénitiens ou à lamelle ou encore les films opaques. L'avantage est notamment de pouvoir les adapter facilement depuis l'intérieur, en fonction des besoins, de la trajectoire du soleil et de l'heure (par exemple store quasiment fermé sur les fenêtres exposées à l'Est en matinée, ouvert dans l'après-midi, et inversement à l'Ouest).

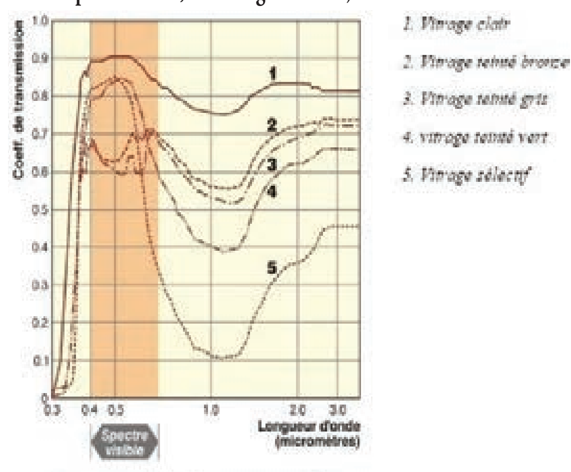
Illustration 4.13 : Variation des coefficients de transmission lumineuse d'un store vénitien de 16mm



Source : Université Catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

Une troisième méthode consiste à moduler l'entrée de lumière en changeant les vitrages. Pour rappel, le rayonnement du soleil est composé en partie de lumière visible mais également d'infrarouges qui entrent dans le bâtiment via les fenêtres et se transforment en chaleur au contact des murs et des objets, créant ainsi un effet de serre.

Illustration 4.14 : Répartition spectrale de différents vitrages en fonction de la teinte (rayons UV à gauche du spectre visible, infrarouges à droite)



Source : Gratia E., Université catholique de Louvain (consultation du site novembre 2014).

Le but d'un vitrage performant sera donc de limiter les apports solaires en bloquant au maximum les infrarouges, tout en laissant passer la partie visible du spectre lumineux. Le tableau suivant donne de plus amples détails sur les coefficients de transmission de la lumière visible (en pourcentage de celle à l'extérieur) et les coefficients de gains de chaleur (facteur solaire) de certains modèles.

Tableau 4.5 : Propriétés de modèles de fenêtres en termes de transmission de la lumière visible et des apports de chaleur

Coefficients de transmission de la lumière visible/apports de chaleur, en pourcentages				
Système de vitrage	**Transparente**	**Teinte bleu-vert**	**Grise**	**Réflective**
Simple (6mm)	89/81	75/62	43/56	20/29
Double vitrage (6+6)	78/70	67/50	40/44	18/21
Double, revêtement dur à faible émissivité, argon	73/65	62/45	37/39	17/20
Double, revêtement mou à faible émissivité, argon	70/37	59/29	35/24	16/15
Triple, revêtement dur à faible émissivité, argon	64/56	55/38	32/26	15/17
Triple, revêtement mou à faible émissivité, argon	55/31	52/29	30/26	14/13

Source : Robertson K. (sans date), p. 16.

Certains doubles vitrages transparents laissent ainsi passer 70 % de la lumière visible, pour un facteur solaire réduit à 37 % seulement (données généralement fournies par le fabricant).

À noter que les gains thermiques peuvent évoluer en fonction du choix des cadres et des meneaux : ceux-ci peuvent être une source importante de transferts thermiques qui doivent particulièrement être évités au sein de bâtiments climatisés (ajout de charges frigorifiques, voir chapitre 5). Il est donc conseillé d'utiliser dans ces cas des matériaux à faible conductivité thermique tels que le bois, le vinyle ou la fibre de verre[5].

Encadré 4.3 : Conseils pour l'intégration des protections solaires

- Dans le cas de l'utilisation de fenêtres à faible coefficient de transmission de la lumière visible, il est conseillé d'opter pour des protections extérieures plutôt qu'intérieures car celles-ci perdront alors en efficacité.
- Les auvents, lanterneaux ou étagères à lumière sont d'excellentes protections contre les rayonnements solaires en milieu de journée mais moins en matinée et en après-midi. Ils ont également d'importants effets en termes de luminosité entrante.
- L'utilisation de ces protections influe sur les apports de chaleur et doit donc être considérée dans le dimensionnement des installations d'air conditionné, si applicable.
- L'utilisation de protections extérieures et le dimensionnement des fenêtres doivent être pesés en fonction des objectifs de ventilation et d'éclairage naturels, de leurs coûts et des bénéfices escomptés tout au long du cycle de vie du bâtiment.
- Les protections intérieures sont généralement les moins efficaces, surtout du point de vue des apports thermiques. Le choix des couleurs, du type de protection et de la modularité du système seront des paramètres importants à considérer.

4.6 Intégration avec la lumière artificielle

D'autres méthodes permettent de réduire la demande en lumière artificielle, un enjeu d'autant plus important que le ratio entre lumière utile et énergie consommée pour la produire est faible : moins de 1 % de l'énergie primaire utilisée par les centrales électriques fonctionnant au charbon est ainsi effectivement convertie en lumière utile[6].

5. Robertson K. (sans date), p. 16.

6. Université De Montfort, 2011.

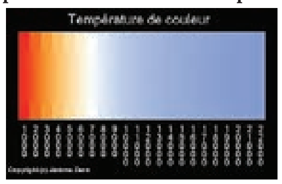
Trois éléments sont à considérer dans une stratégie d'éclairage artificiel intégrée: le choix des ampoules, le choix des luminaires et les stratégies de contrôle.

4.6.1 Choix des ampoules et luminaires

Le choix d'une lampe doit se fonder en fonction des besoins sur plusieurs critères à savoir:

- ***sa puissance***, en Watt;
- ***son efficacité lumineuse***, en lumens par Watt. Plus cette valeur est grande, plus la lampe possède de capacités d'éclairage à puissance donnée;
- ***sa durée de vie***, généralement plus élevée pour les ampoules ayant une efficacité lumineuse plus réduite;
- ***sa température de couleur*** (ou température de couleur corrélée), en degrés Kelvin: une couleur froide correspond à une température de couleur élevée et inversement. À titre d'exemple, la lumière naturelle au coucher du soleil produit environ 2000 K (degrés Kelvin), contre 20000 K en journées ensoleillées;

Illustration 4.15: Dégradé des températures de couleur et correspondance en degrés Kelvin



Source: Dorn J. via Wikipédia (consultation du site novembre 2014).

- ***son Indice de Rendu des Couleurs*** (IRC, ou R_A selon la norme CIE), qui caractérise la capacité d'une lampe à restituer la couleur de l'objet qu'elle éclaire, avec des notes allant de 0 à 100 (100 correspondant à la lumière du jour, un indice minimum de 75 à 80 étant recherché pour un bon rendu) regroupées dans des catégories allant de 4 à 1a et 1b. Des activités demandant un excellent rendu de couleur nécessiteront l'utilisation d'ampoules 1a, alors que les groupes inférieurs (moins chers, plus économes et avec une durée de vie supérieure) devront être privilégiés lorsque les activités le permettront.

Tableau 4.6: Valeur des plages d'IRC et correspondance en perception des couleurs

Plage d'IRC	Perception des couleurs
Ra < 25	Faible
25 <Ra < 65	Moyenne
35 < Ra < 90	Bonne
90 < 90	Élevée

On définit des classes d'IRC en fonction de la plage d'IRC:

Classe d'IRC	IRC
1A	Ra > 90
1B	90 > IRC > 80
2	80 > IRC > 60
3	60 > IRC > 40

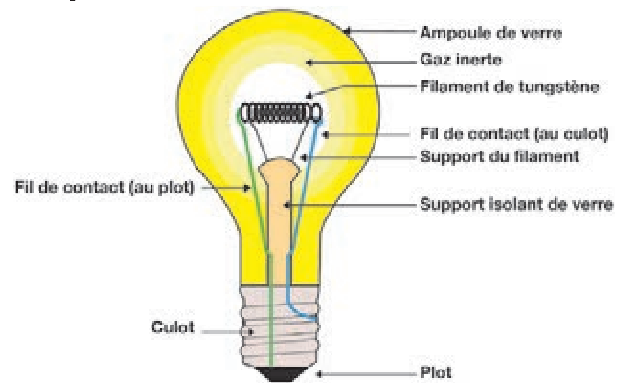
Source: Energetic, www.labo-energetic.eu (consultation novembre 2014).

On distingue généralement quatre types d'ampoules : les ampoules à incandescence, les lampes halogènes, les tubes et lampes fluorescents et les lampes LED.

4.6.1.1 Ampoules à incandescence

Cette technologie, utilisée depuis le 19e siècle, est aujourd'hui appelée à disparaître pour des modèles plus efficaces. Le fonctionnement est basé sur un filament de tungstène placé dans une enveloppe de verre généralement remplie de gaz inerte tel que l'argon, le krypton ou le zénon. Le tungstène est porté à incandescence par le passage d'un courant électrique, ce qui a pour effet de l'éclairer et de produire de la lumière.


Illustration 4.16 : Ampoule à incandescence



Source : http://controverses.sciences-po.fr/archive/ampoules/index.php/pour-debuter/les-differents-types-de-lampes/ (consultation décembre 2015).

L'efficacité est assez faible (13lm/W, avec une fourchette de 9 à 17) avec 95 % de l'énergie consommée transformée en chaleur, et une température de l'ampoule pouvant s'élever à plus de 150°C. Sa durée de vie est également inférieure aux autres modèles, 1000 heures en moyenne, 1500 heures maximum[7].

4.6.1.2 Les lampes halogènes

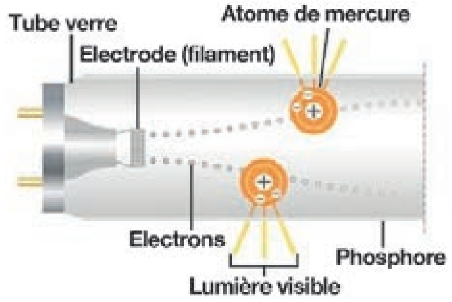
Dans ce type de lampe un gaz de la famille des halogènes (fluor, iode) se combine avec le tungstène et se dépose sur le filament. L'augmentation de la température permet un accroissement de sa durée de vie et également des économies d'énergie de 30 à 50 % comparativement aux lampes à incandescence. Sa luminosité est plus élevée également mais son usage peut être coûteux[8].

7. Sources diverses, voir notamment : http://controverses.sciences-po.fr/archive/ampoules/index.php/pour-debuter/les-differents-types-de-lampes/ (consultation décembre 2015).
8. http://controverses.sciences-po.fr/archiveindex/ (consultation décembre 2015).

4.6.1.3 Les tubes et lampes fluorescents et fluocompactes

Amené à remplacer progressivement les lampes à incandescence, le système de lampes fluorescentes repose sur l'interaction entre les électrodes émis par deux filaments de tungstène et des atomes de mercure. Cette interaction crée un rayonnement ultraviolet qui est converti en lumière visible par la couche fluorescente présente sur la face interne du tube.

Illustration 4.17 : Représentation schématique d'un tube fluorescent



Source : Université Catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

4.6.1.4 Les lampes à LED

Enfin, les lampes à LED (Light Emitting Diode) utilisent une diode électroluminescente pour transformer l'électricité en lumière. Ces ampoules ont un très bon rendement de lumière par rapport à l'énergie qu'elles consomment, chauffent peu et ont une durée de vie assez longue (jusqu'à 100 000 heures) [9].

Illustration 4.18 : Exemples de lampes à LED



Source : Inovelec (consultation novembre 2014).

9. http://controverses.sciences-po.fr/archive/ampoules/index.php/pour-debuter/les-differents-types-de-lampes/ (consultation décembre 2015).

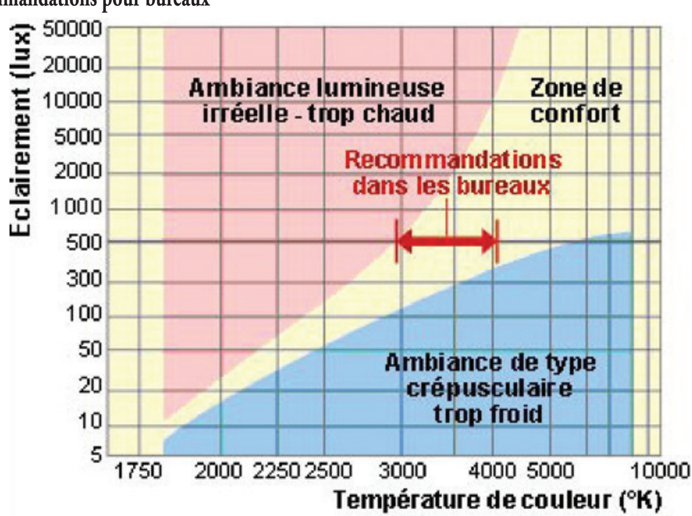
Tableau 4.7 : Comparatif des différents types d'ampoules

PERFORMANCES DES DIFFÉRENTES LAMPES						
Type de lampe	Puissance (W)	Flux lumineux (lm)	Efficacité lumineuse (sans ballast) (lm/W)	Indice de rendu des couleurs (IRC)	Température de couleur (K)	Durée de vie moyenne (h)
Incandescente	25 à 500	220 à 8 200	9 à 16	100	2 700	1 000
Halogène	40 à 2 000	500 à 50 000	12,5 à 25	100	3 000	2 000
Tube fluorescent	14 à 58	1 150 à 5 200	64 à 104	60 à 90	2 700 à 6 500	14 000 à 18 000
Fluocompacte	5 à 55	200 à 4 800	39 à 87	80	2 700 à 4 000	8 000 à 13 000
Led	2 à 7	5 à 20	50	70 à 85	2 700 à 6 500	50 000 à 100 000

Source : www.systemed.fr (consultation novembre 2014).

Le choix du type d'ampoule devra donc dépendre de tous ces facteurs et de la luminosité recherchée dans les pièces du bâtiment.

Illustration 4.19 : Relation entre éclairement et température de couleur, et recommandations pour bureaux



Source : www.labo-energetic.eu (consultation novembre 2014).

4.6.1.5 Luminaires

Un autre élément à considérer et pouvant impacter la consommation énergétique est le choix des luminaires. Le tableau ci-dessous donne quelques indications sur les différents types de luminaires à adopter en fonction de l'utilisation.

Tableau 4.8 : Indications pour choix des luminaires

Luminaires / Applications	Bureaux	Boutiques	Musées	Restaurants, hôtels, hôpitaux	Circulations	Industrie
Plafonniers (encastrés, en saillie)	Éclairage général	Éclairage général	Éclairage général	Éclairage général	Éclairage général	Éclairage général
Projecteurs (ou spots)		Éclairage d'accentuation	Éclairage d'accentuation	Éclairage d'accentuation		
Lignes continues	Éclairage général	Éclairage général		Éclairage général		Éclairage général
Suspensions	Éclairage général, architectural	Éclairage général, architectural		Éclairage général, architectural		Éclairage général, architectural
Appliques	Éclairage d'appoint	Éclairage d'appoint	Éclairage d'appoint	Éclairage d'appoint	Éclairage général	
Lampes à poser	Éclairage localisé	Éclairage localisé		Éclairage localisé		
Encastrés de sol et muraux			Guidage visuel, balisage	Guidage visuel, balisage	Guidage visuel, balisage	
Systèmes à fibres optiques		Éclairage localisé	Éclairage localisé	Éclairage localisé		

Source : www.territorial.fr (consultation novembre 2014).

4.6.2 Méthodes de contrôle

Il existe enfin un certain nombre de méthodes de contrôle permettant d'améliorer les performances globales de l'éclairage artificiel et son intégration avec l'éclairage naturel. Celles-ci peuvent notamment se résumer en :

- Choisir avec soin la localisation des interrupteurs : plus ceux-ci sont accessibles et positionnés près des zones à éclairer, plus les occupants seront enclins à les utiliser pour moduler l'utilisation de la lumière artificielle en fonction de leurs besoins ;
- Privilégier les lampes qui peuvent être éteintes ou allumées à un niveau local, plutôt qu'un éclairement centralisé qui peut amener des gaspillages et un manque de flexibilité ;
- Opter si possible pour des méthodes automatiques permettant par exemple l'arrêt de l'éclairage dans les bureaux aux périodes creuses de la journée (repas ou soirées) ;
- Installer des minuteurs pour éviter que des lumières ne restent allumées sur de longues périodes d'inactivité. De la même manière, un détecteur de présence peut permettre de n'éclairer une pièce que lorsque celle-ci est effectivement utilisée ;
- Installer des détecteurs de luminosité : les lumières ne s'allument que lorsque le niveau d'éclairement requis n'est pas atteint. Cet outil est particulièrement conseillé si le bâtiment a été conçu pour un éclairage naturel.

Ces méthodes sont en général peu coûteuses, particulièrement si elles sont intégrées dès la conception du bâtiment, et peuvent également permettre de meilleures interactions entre éclairage naturel et électrique.

Encadré 4.4 : Choix des équipements et Gestion Technique du Bâtiment

À l'image de l'éclairage, les appareils électriques sont la source d'une consommation énergétique importante qui doit être atténuée via :

- la sélection d'appareils efficients, en s'appuyant sur les standards de performances, et
- une bonne gestion des appareils, et notamment de leur temps de veille, qui peut représenter une part importante de la consommation énergétique totale de l'appareil.

Le choix des appareils électriques pourra être combiné à un système de comptage énergétique pour faciliter le suivi de consommation et détecter rapidement de potentielles défaillances, ou, pour les grandes structures, à l'installation d'une Gestion Technique du Bâtiment (GTB). La GTB est un système informatique permettant de superviser l'ensemble des équipements d'un bâtiment, notamment l'alimentation électrique, l'éclairage, les systèmes d'air conditionné, la plomberie ou encore la vidéosurveillance, et donc de rationaliser au mieux les différents pôles de consommation.

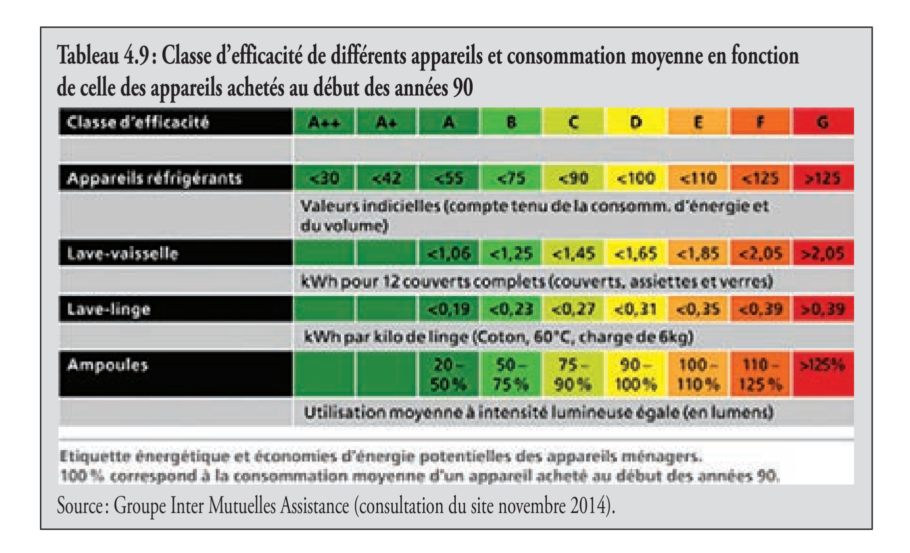


Tableau 4.9 : Classe d'efficacité de différents appareils et consommation moyenne en fonction de celle des appareils achetés au début des années 90

Classe d'efficacité	A++	A+	A	B	C	D	E	F	G
Appareils réfrigérants	<30	<42	<55	<75	<90	<100	<110	<125	>125
	Valeurs indicielles (compte tenu de la consomm. d'énergie et du volume)								
Lave-vaisselle			<1,06	<1,25	<1,45	<1,65	<1,85	<2,05	>2,05
	kWh pour 12 couverts complets (couverts, assiettes et verres)								
Lave-linge			<0,19	<0,23	<0,27	<0,31	<0,35	<0,39	>0,39
	kWh par kilo de linge (Coton, 60 °C, charge de 6kg)								
Ampoules			20 – 50 %	50 – 75 %	75 – 90 %	90 – 100 %	100 – 110 %	110 – 125 %	>125%
	Utilisation moyenne à intensité lumineuse égale (en lumens)								

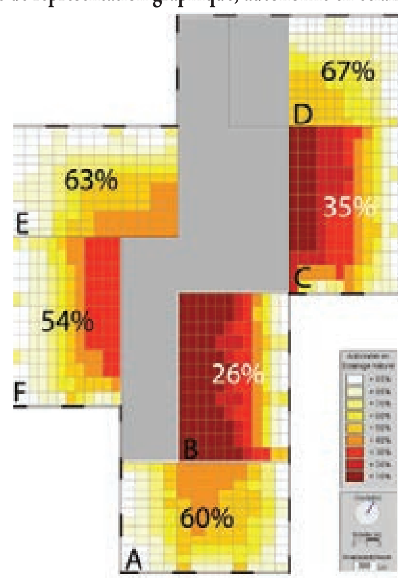
Etiquette énergétique et économies d'énergie potentielles des appareils ménagers.
100 % correspond à la consommation moyenne d'un appareil acheté au début des années 90.

Source : Groupe Inter Mutuelles Assistance (consultation du site novembre 2014).

4.6.3 Autonomie en lumière du jour

Une représentation graphique de l'autonomie en lumière du jour (pourcentage de l'éclairage requis fourni par la lumière naturelle) des locaux peut finalement permettre une meilleure intégration avec l'éclairage artificiel. Elle peut également servir, à l'image du zonage thermique, dans l'optimisation des dispositions des différentes pièces.

Illustration 4.20 : Exemple de représentation graphique, autonomie en éclairage naturel



Source : Paule Bernard, 2007.

Références

Ashikur Rahman Joarder, Zebun Nasreen A., A. Price et Monjur Mourshed, 2009. *A simulation assessment of the height of light shelves to enhance daylighting quality in tropical office buildings under overcast sky conditions in Dhaka, Bangladesh*, 11th international IBPSA Conference, Glasgow, UK, disponible via http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1706_1713.pdf.

BRE, 1994. *Daylight, Sunlight and Lighting control, Energy Efficiency in Offices*, HMSO, Londres.

BRE, 1997. *BICEPS Module : Lighting and Energy Efficiency*, Building Research Energy Conservation Support Unit (BRECSU), Building Research Establishment, Garston, Royaume-Uni.

Chang S. et Krueger B., 2008. *Proposed Energy Efficiency Modifications to the planned ESE/CSE Building*, disponible via http://ese.wustl.edu/ContentFiles/Research/UndergraduateResearch/CompletedProjects/WebPages/sp08/StephanieChangBenKrueger/seniordesignfinal2.htm.

Cleland D., 2005. *People and Energy, how do we use it*, conference on sustainable energy use and management, Royal Society of New Zealand de Christchurch, Wellington, Nouvelle-Zélande, pp. 82-84.

Courret G., Giaccari I., Michel L., Scartezzini J.L. et Suter T., 2000. *Intégration de dispositifs anidoliques d'éclairage naturel en façade*, LESO-PB, EPFL et Felix Construction, Lausanne et Bussigny, Suisse, disponible via http://www.empa-ren.ch/Internet-Files/Programm/Aktuelles/aktualitaeten/Status-Seminar/pdf-files/scartezzini-j-l.pdf.

Paule Bernard, 2007. *Lumière diffuse : le ciel*, UE-M : Espace et lumière, le projet d'éclairage, EPFL-ENAC, disponible via http://moodle.epfl.ch/file.php/3371/DOCUMENTS/COURS_THEORIE/Ciel.pdf.

Robertson K. M. Arch, s.d. *Daylighting Guide for Buildings,* NSAA, Solterre Design, disponible via http://www.cmhc-schl.gc.ca/en/inpr/bude/himu/coedar/upload/Daylighting-Guide-for-Buildings.pdf.

Smith, B.J., Phillips, G.M. et Sweeney, M., 1982. *Environmental Science*. Longman Scientific and Technical, Harlow.

Solener, 2014. *L'architecture bioclimatique en climat tropical humide : Conception thermique,* Module pour l'Initiative pour la Promotion des Villes Durables en Afrique, octobre 2014, Lomé, Togo.

Solener, ADEME, 2014. *Guide climatisation tertiaire en Guyane,* ADEME Guyane (version d'octobre 2013).

Sonepar, s.d. *Fiche blueway, éclairage, législation et technologie dans le tertiaire et industrie*, http://www.bianchi-sonepar.fr/documents/Fiche-Eclairage-Legislations-No03.pdf.

Université De Montfort, 2011. *Energy in Buildings*, module du MSc Climate Change and Sustainable Development, Leicester, UK.

Université de Harvard, 2009. *A design sequence for diffuse daylighting, Rules of Thumb*, disponible via http://isites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic539779.files/Diffuse%20Daylighting%20Design%20Sequence.pdf.

Sites internet *(dernière consultation en novembre 2014)* et sources additionnelles des illustrations

CERN solar club : http://solar-club.web.cern.ch/solar-club/Textes/SEV/sev1701.html

Controverses Sciences Po (regroupant de multiples établissements d'éducation supérieure) : http://controverses.sciences-po.fr/archive/ampoules/index.php/pour-debuter/les-differents-types-de-lampes/

Dorn J., via Wikipédia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature_de_couleur

Énergies Éco Renouvelables : http://www.energies-eco-renouvelables.fr/solaire.html

Energetic, laboratoire pour éduquer à l'énergie durable : http://labo-energetic.eu/fr/labo/boite_outils_guide_4.php?PHPSESSID=f066a889e2324b17ddbc26124378d145

Environmental Design in University Curricula and Architectural Training in Europe : http://www.educate-sustainability.eu/home

Gratia E., Université catholique de Louvain : www.energie2.arch.ucl.ac.be/

Groupe Inter Mutuelles Assistance : http://www.imagroupe.eu/fr/rse/changement_climatique.php

Inovelec : http://www.inovelec.com/autres-produits/lampes-led

McGraw Hill Construction, Continuing Education, Daylighting in School : http://continuingeducation.construction.com/article_print.php?L=48&C=252

Système D : http://www.systemed.fr/

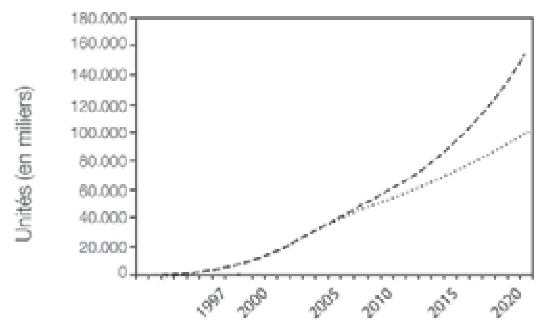
Territorial.fr : http://www.territorial.fr/PAR_TPL_IDENTIFIANT/4925/TPL_CODE/TPL_OVN_CHAPITRE_FICHE/2690-consultation-guide-de-l-eclairage-public-voirie-et-batiments.htm

Université Catholique de Louvain (Cellule de Recherche en Architecture et Climat), *Site Energie +* : http://www.energieplus-lesite.be

Chapitre 5
Systèmes d'air conditionné et climatisation

La demande énergétique associée aux systèmes de climatisation et d'air conditionné est aujourd'hui estimée à plus de 1000 milliards KWh au niveau mondial (près de deux fois la consommation totale du continent africain)[1] et représente pour certains pays tropicaux plus de 30 % de leur facture énergétique[2]. Cette demande devrait poursuivre sa croissance actuelle, notamment sous l'effet de la rapide urbanisation des pays du Sud et en réponse au réchauffement climatique. Une bonne gestion dans ce domaine est donc un enjeu majeur du bâtiment durable.

Illustration 5.1 : Projection du nombre de systèmes d'air conditionné dans les provinces chaudes de Chine



Source : Koizumi S., 2007 (illustration redessinée par ENERGIES 2050).

5.1 Évaluation des besoins frigorifiques

Un système d'air conditionné permet de contrôler les conditions climatiques d'un bâtiment en s'assurant du renouvellement de l'air et en y régulant la température et le degré d'hygrométrie. Si les stratégies passives peuvent permettre de diminuer ces besoins, l'air conditionné peut néanmoins s'avérer indispensable pour garantir le confort des occupants en climat tropical. Si tel est le cas, il est déterminant qu'il soit conçu et calibré pour répondre à des besoins spécifiques : un surdimensionnement aura des effets

1. Dahl R., 2013.

2. Ahmadul Ameen, 2005.

négatifs sur les futures dépenses énergétiques et sur les coûts de construction, tandis qu'un sous dimensionnement ne permettra pas d'atteindre les objectifs fixés en termes de confort thermique.

L'évaluation des charges frigorifiques passe par une analyse complexe de la thermie du bâtiment, ce qui requiert généralement l'intervention d'un spécialiste. Le ***guide sur l'efficacité énergétique de la climatisation en régions tropicales***[3], publié par l'Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD, anciennement dénommé Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie – IEPF –), propose néanmoins une procédure simplifiée que nous allons reprendre ci-dessous. Cette procédure a été conçue dans le cadre d'une évaluation portant sur un ensemble de pays tropicaux d'Afrique, et il conviendra donc de calibrer certaines données en fonction de la localisation du site.

Encadré 5.1 : Quand utiliser une climatisation artificielle ?

Si l'objectif premier est de privilégier le refroidissement naturel et de limiter les apports thermiques grâce à une bonne conception du bâtiment, se passer entièrement des systèmes de climatisation artificielle n'est pas toujours réalisable. Cela sera notamment le cas si les systèmes de climatisation naturelle s'avèrent inadaptés pour traiter l'espace intérieur, par exemple en cas de forts apports internes (taux d'occupation élevé, nombreuses machines) ou d'obstacles importants à la ventilation naturelle. L'objectif sera alors de limiter les charges et d'opter pour le système actif le plus efficace et adapté au bâtiment.

Nous verrons par ailleurs comment les principaux éléments du design passif présentés précédemment s'intègrent dans l'évaluation thermique du bâtiment. Ces éléments comprennent notamment :

- Les caractéristiques de l'enveloppe : types de matériaux, caractéristiques thermiques, dimensions et plans d'architectes ;
- L'orientation du bâtiment et les couleurs des matériaux ;
- Les conditions extérieures (microclimat, topographie, urbanisation, végétation, etc.) ;
- Les ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment, essentiellement les portes et fenêtres, avec emplacement, caractéristiques, taille et orientation ;
- Le type d'éclairage ;
- Les taux d'occupation des pièces ainsi que le type d'activités ;

3. Pour un accès au guide complet : http://ifdd.francophonie.org/ressources/ressources-pub-desc.php?id=152 (consultation novembre 2014).

- L'emplacement des équipements et des réseaux de distribution (eau, ventilation) ;
- L'ensemble des appareils électriques, leurs caractéristiques (puissance, durée de vie, fréquence d'utilisation) et leurs emplacements.

Effectuer le bilan thermique du bâtiment en amont peut en cela permettre de créer une meilleure synergie entre stratégies actives et passives d'efficacité énergétique.

5.1.1 Climat local et interaction avec le bâtiment

5.1.1.1 Analyse du climat et zone de confort

Une des premières étapes dans l'évaluation des besoins en air conditionné est l'analyse du climat local pour le mois le plus chaud, où les charges seront donc maximales.

Tableau 5.1 : Exemple de caractéristiques climatiques de villes tropicales africaines

Zones climatiques	Pays	Villes de référence	Température sèche [°C]	Température humide [°C]	Direction du vent	Vitesse du vent |km/h|
Climat tropical humide	Cameroun	Douala	32	29	S-O	7,3
	Côte d'Ivoire	Abidjan	32,5	27,5	S-O ou S	9,5

Source : IEPF, 2006, p. 5 et Windfinder (consultation novembre 2014).

Il convient ensuite de définir une zone de confort, généralement valable pour des occupants en tenues légères exerçant des activités sédentaires dans les conditions ambiantes de leurs bureaux climatisés. Nous avons déjà pu évoquer ce point dans la partie sur les diagrammes bioclimatiques (cf. Chapitre 1). À titre d'illustration, des zones de confort avec des températures sèches variant entre environ 24 et 28 degrés (soit un écart de 4 à 8 degrés avec les conditions extérieures présentées ci-dessus) et une humidité relative de 60 à 70 % étaient ainsi définies comme acceptables pour Douala et Abidjan[4].

5.1.1.2 Propriétés thermiques du bâtiment

Les interactions entre le bâtiment et son environnement dépendront en grande partie des propriétés thermiques des matériaux utilisés dans la construction. Le coefficient de transmission de chaleur k (W/m²K) à travers les parois (par conduction et convection) peut ainsi être défini par l'équation suivante[5] :

$$(1)\ k = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_i}}$$

4. IEPF, 2006.
5. IEPF, 2006 p. 8.

Où,

- h_e et h_i = coefficients globaux de convection (ou de transfert thermique superficiel) sur les murs, respectivement à l'extérieur et à l'intérieur de la paroi (W/mK) ; et
- λ = coefficient de conductivité thermique de la paroi considérée (W/m²K).

Les valeurs de h_e et de h_i (aussi appelés coefficients d'échanges thermiques superficiels) varient peu et sont généralement fournies dans les réglementations thermiques. Des exemples types sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 5.2 : Valeurs *he* et *hi* en fonction du type de parois

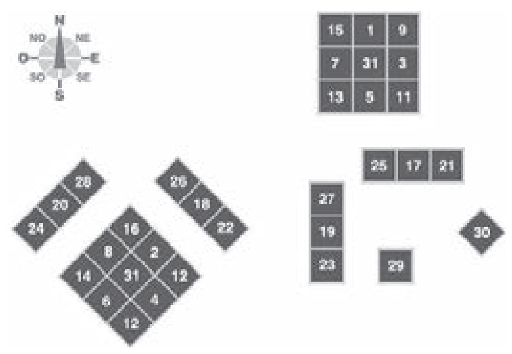
	Parois en contact avec l'extérieur			Parois en contact avec un autre local, un comble ou un vide sanitaire			Parois vitrées
	Murs	Plafonds	Planchers	Murs	Plafonds	Planchers	
He	16,7	20	20	9	20	5,9	16,7
Hi	9	11,1	5,9	9	20	5,9	9

Source : IEPF, 2006.

5.1.1.3 Orientation des locaux du bâtiment

L'exposition d'un local aux radiations solaires dépendra de son orientation et de sa position dans le bâtiment (nombre de façades exposées), facteurs qui auront donc un impact important sur les futures charges frigorifiques. Le guide sur l'efficacité de la climatisation identifie dans ce cadre 31 types d'orientations possibles, illustrés ci-dessous.

Illustration 5.2 : Types d'orientation des locaux



Source : IEPF, 2006, p. 10.

Les locaux de type 31 (sans façade donnant sur l'extérieur) auront ainsi des charges frigorifiques extérieures inférieures à celles des locaux de type 3 et 7 (exposés Est et Ouest) par exemple. De nouveau, le bilan thermique s'effectuera à l'heure où les charges de réfrigération sont maximales pour chaque local. Cette heure sera déterminée en fonction de l'exposition des parois aux radiations et des apports de chaleur internes (personnes, lumières et équipements) prévisionnels.

5.1.2 Calcul des apports calorifiques

5.1.2.1 Apports de chaleur extérieurs

On peut distinguer cinq sources principales d'apports de chaleur extérieurs, qui peuvent être estimées en suivant les équations suivantes[6] :

Apport de chaleur par transmission à travers les parois extérieures (murs, toit, plafond et plancher) et les vitrages

$$(2)\ Q_R = k \cdot S \cdot \Delta\theta$$

Où,

- Q_R = apport de chaleur par transmission à travers les parois extérieures, en W ;
- k = coefficient de transmission thermique de la paroi ou du vitrage considéré en W/m²C° ;
- S = surface de la paroi ou de la fenêtre considérée (m²) ;
- $\Delta\theta$ = différence de température entre les deux faces (extérieure/intérieure) de la paroi considérée (K), aux heures les plus chaudes.

Tableau 5.3 : Exemples de coefficients globaux de transmission thermique (k) des parois en W/m²C°

Types de parois	Types d'enduits	Épaisseurs [cm]		
		10	**15**	**20**
Parpaings creux (agglomérés creux)	Aucun	2,80	2,65	2,43
	Enduit extérieur et intérieur au béton	2,37	2,20	2,09
	Plâtres ou carreaux	2,55	2,38	2,26
	Lattes de bois	1,69	1,64	1,59
	Panneaux isolants	1,30	1,24	1,18
Béton coulé	Aucun	1,75	1,41	1,18
	Enduit extérieur et intérieur au béton	1,69	1,36	1,14
	Plâtres ou carreaux	1,59	1,30	1,08
	Lattes de bois	1,24	1,02	0,84
	Panneaux isolants	1,02	0,90	0,79
		11	**22**	**33**
Briquettes de terre	Aucun	3,25	2,20	1,62
	Enduit extérieur et intérieur au béton	3,10	2,50	1,80
	Plâtres ou carreaux	2,90	2,10	1,50

6. IEPF, 2006 pp. 12-18.

Tableau 5.3 : Exemples de coefficients globaux de transmission thermique (k) des parois en W/m²C° (*suite*)

Types de parois	Types d'enduits		Épaisseurs [cm]			
			2,5	**3,2**	**3,8**	**4,4**
Portes en bois	Châssis simple		3,94	3,36	3,00	2,90
	Châssis double		1,97	1,86	1,94	1,74
Toitures	Tuiles – ardoises – fibrociment	Sans solivage			5,80	
		Avec solivage			4,06	
	Tôle galvanisée ondulée	Sans solivage			9,28	
		Avec solivage			4,64	
Vitrage simple	Châssis en bois				5,0	
	Châssis métallique				5,8	
Vitrage double	Avec lame d'air de 6mm	Châssis en bois			3,3	
		Châssis métallique			4,0	
	Avec lame d'air de 8mm	Châssis en bois			3,1	
		Châssis métallique			3,9	
	Avec lame d'air de 10mm	Châssis en bois			3,0	
		Châssis métallique			3,8	

Source : IEPF, 2006 p. 14.

Tableau 5.4 : Différence de température $\Delta\theta$ entre les différentes faces des parois

Types de parois	$\Delta\theta$ [°C]
Murs extérieurs ensoleillés	$\Delta\theta = \theta_e - \theta_i$
Murs en contact avec les locaux non conditionnés	$\Delta\theta = \theta_e - \theta_i - 3°C$
Plafond sous comble ventilé	$\Delta\theta = \theta_e - \theta_i + 3°C$
Plafond sous comble non ventilé	$\Delta\theta = \theta_e - \theta_i + 12°C$
Plancher sur terre pleine	$\Delta\theta = +20°C - \theta_i$
Mur en contact avec la cuisine	$\Delta\theta = \theta_e - \theta_i + 18°C$

Source : IEPF, 2006 p. 15.

Les toitures et les fenêtres sont ainsi (tableau ci-dessus) les principales sources d'échanges thermiques avec l'extérieur. En général une plus grande surface vitrée amènera donc une plus grande conductivité des parois et donc une plus grande consommation en air conditionné, comme le montre l'exemple ci-après.

Illustration 5.3 : Relations entre pourcentage de surfaces vitrées des parois et consommation électrique dans 8 bâtiments commerciaux équipés d'air conditionné au Cameroun

Source : ENERGIES 2050, d'après Kemajou et al., 2007, p. 3.

Apport de chaleur par rayonnement solaire à travers les parois

La quantité de chaleur traversant le mur Q_M en W :

$$(3)\ Q_M = \alpha.F.S.R_M$$

Où,

- α = coefficient d'absorption de la paroi recevant le rayonnement (fonction de la couleur et nature du mur) ;
- S = surface de la paroi (m²) ;
- F = facteur de rayonnement solaire (part absorbée par la surface et transmise vers l'intérieur du local) ;
- R_M = rayonnement solaire sur la surface du mur (W/m² – voir tableau 5.7 ci-dessous), qui dépend :
  - De la latitude sous laquelle le local se trouve ;
  - De l'orientation du mur ;
  - De l'heure à laquelle le calcul sera effectué.

Tableau 5.5 : Coefficients d'absorption α pour murs et toits

CATÉGORIES DE TEINTES	COULEURS	VALEURS DE α À UTILISER
Noire	Gris foncé, brun sombre, noir	1
Sombre	Brun, vert sombre, bleu vif, gris clair, bleu sombre	0,8
Moyenne	Rouge sombre, vert clair, bleu clair	0,6
Claire	Blanc, jaune, orange, beige, crème, rouge clair	0,4

Source : Solener, 2014.

Tableau 5.6 : Facteur F de rayonnement solaire

K coefficient de transmission thermique de la paroi considérée [W/m²°C]	F coefficient du rayonnement solaire
0	0
1	0,05
2	0,1
3	0,15
4	0,20

N.B : Interpoler pour les coefficients intermédiaires.
Source : IEPF, 2006.

Tableau 5.7 : Exemple d'intensité du rayonnement solaire sur murs et vitrages en W/m², latitude 4°Nord en février

Heu	Hor			S		E		O		N-E		N-O		S-E		S-O	
		m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v
7	111	62	53	64	55	71	61	62	53	70	60	62	53	66	57	62	53
8	263	131	113	146	126	176	152	131	113	173	149	131	113	153	131	131	113
9	385	186	160	212	182	249	214	186	160	249	214	186	160	211	182	186	160
10	500	223	191	269	232	298	257	223	191	309	266	223	191	243	209	223	191
11	625	258	222	330	284	317	273	258	222	351	302	268	230	258	222	258	222
12	686	272	234	359	309	272	234	272	234	333	287	333	287	272	234	272	234
13	686	256	220	352	303	256	220	335	288	268	231	380	326	256	220	256	220
14	563	216	186	290	249	216	186	335	288	216	186	352	303	216	186	249	214
15	395	166	143	207	178	166	143	264	227	166	143	265	228	166	143	206	177
16	201	150	129	134	115	150	129	100	86	150	129	103	89	150	129	126	109
17	54	31	27	32	27	31	27	33	29	31	27	33	28	31	27	32	28

Source : IEPF, 2006.

Apport de chaleur par rayonnement solaire sur les vitrages

La quantité de chaleur traversant le vitrage Q_V (W) :

$$(4)\ Q_V = \alpha . g . S . R_V$$

Où,

- α = coefficient d'absorption du vitrage (sans dimension) ;
- g = facteur de réduction qui varie en fonction du mode de protection de la fenêtre contre le rayonnement solaire (extérieure, intérieure, vitre teintée, etc.) ;
- S = surface vitrée (m²) ;
- R_V = intensité du rayonnement solaire sur les vitrages (W/m²), définie de façon similaire à Rm.

Tableau 5.8 : Facteurs de réduction g des fenêtres protégées

Fenêtres protégées	Couleurs	g
Stores extérieurs en toile	Écru	0,28
Stores extérieurs en toile	Aluminium	0,22
Stores intérieurs entièrement baissés	Aluminium	0,45
Stores intérieurs à moitié baissés	Blanc ou crème	0,63
Persiennes entièrement baissées à l'intérieur des fenêtres	Aluminium	0,58
Persiennes entièrement baissées à l'extérieur des fenêtres	Aluminium	0,22

Source : IEPF, 2006 p. 15.

Tableau 5.9 : Exemple d'intensité du rayonnement solaire pour murs (m) et vitrages (v), en W/m², 8e parallèle Nord en mars (mois le plus chaud)

Heu	Hor			S		E		O		N-E		N-O		S-E		S-O	
		m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v
7	604	129	103	164	131	585	468	127	102	476	380	127	102	426	341	127	102
8	410	158	126	177	141	312	249	158	126	280	224	158	126	253	203	158	126
9	639	225	180	267	213	450	360	225	180	414	331	225	180	355	284	225	180
10	800	254	203	322	258	482	385	254	203	463	371	254	203	367	293	254	203
11	870	284	227	362	290	408	326	284	227	427	341	284	227	317	253	284	227
12	836	283	226	357	285	283	226	283	226	335	268	335	268	283	226	283	226
13	749	250	200	315	252	250	200	354	283	250	200	370	296	250	200	277	222
14	610	205	164	253	203	205	164	367	294	205	164	354	283	205	164	285	228
15	437	154	123	182	146	154	123	308	247	154	123	283	226	154	123	243	194
16	237	95	76	105	84	95	76	178	142	95	76	160	128	95	76	146	117
17	66	34	27	35	28	34	27	45	36	34	27	42	34	34	27	41	33

Source : IEPF, 2006 p. 17.

Apport de chaleur par renouvellement d'air et infiltration

Nous avons vu précédemment que le renouvellement d'air pouvait être source d'apports de chaleur en régions tropicales. Ils peuvent être définis en gains sensibles et latents[7].

Gains sensibles par renouvellement d'air Q_{Sr} (W) :

$$Q_{Sr} = qv \cdot (\theta e - \theta i) \cdot 0{,}33$$

7. Apports de chaleur latente dus à la différence de quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air extérieur et intérieur. Les apports de chaleur sensibles sont eux mesurés par la température de l'air.

Gains latents par renouvellement d'air Q_{Lr} (W) :

$$Q_{Lr} = q_V \,.\, (\omega e - \omega i) \,.\, 0{,}84$$

Où,

- q_V = débit d'air extérieur de renouvellement (m^3/h) ;
- θe = température extérieure de base (C°) ;
- θi = température intérieure de base (C°) ;
- ωe = teneur en eau de l'air extérieur (g/kg air sec) ;
- ωi = teneur en eau de l'air intérieur (g/kg air sec).

Enseignements pour conception du bâtiment

Contrairement à la ventilation naturelle, pour laquelle l'étanchéité et l'isolation du bâtiment doivent être réduites afin de faciliter les échanges d'air avec l'extérieur, les bâtiments climatisés pourront voir leurs charges réduites via :

- une bonne isolation des parois les plus exposées aux radiations solaires (typiquement orientées Est, Ouest et toits), ainsi que des murs de partitions internes séparant les zones climatisées et non climatisées ;
- l'utilisation de bardages ventilés ;
- l'utilisation des masques solaires ;
- une bonne étanchéité du bâtiment.

5.1.3.2 Gains de chaleur internes

Les principaux apports de chaleur internes proviennent des occupants, des lumières ainsi que des appareils électroniques et des machines. Ceux-ci peuvent être estimés en utilisant les équations suivantes :

Apport de chaleur par les occupants[8]

En fonction de leurs activités et de la température intérieure, les occupants peuvent présenter une source d'apport de chaleur latente et sensible.

Gains sensibles occupants Q_{SOC} (W) :

$$Q_{SOC} = n \,.\, C_{SOC}$$

Gains latents occupants Q_{LOC} (W) :

$$Q_{LOC} = n \,.\, C_{LOC}$$

Où,

- n = nombre d'occupants ;
- C_{SOC} = chaleur sensible des occupants (W) ;
- C_{LOC} = chaleur latente des occupants (W).

8. IEPF, 2006 pp. 18-20.

Tableau 5.10 : Apport de chaleur par les occupants

Activités	Application	Température ambiante [°C]						Émissions thermiques totales [W]
		25 °C		26 °C		27 °C		
		Chaleur sensible [W]	Chaleur latente [W]	Chaleur sensible [W]	Chaleur latente [W]	Chaleur sensible [W]	Chaleur latente [W]	
Assis au repos	École, théâtre	65	37	62	40	60	42	102
Travail léger	Bureau, hôtel, appartement	67	49	63	59	56	60	116
Debout, marche lente	Magasin, boutique	68	63	63	68	57	74	131
Repas	Restaurant	77	84	71	90	64	97	161
Travail facile	Atelier	80	140	72	148	67	153	220
Danse	Boîte de nuit	88	161	80	169	75	174	249
Travail difficile	Usine	149	277	142	284	136	290	426

Ces données sont valables pour un homme adulte et devront être minorées de 20 % pour les femmes, de 20 à 40 % pour les enfants, et de 10 % pour un public mixte.

Apport de chaleur par l'éclairage

Comme indiqué en partie 5, l'éclairage artificiel constitue une source de chaleur Q_{Secl} (W) dans des proportions qui varient en fonction du type de lampe :

Lampe fluorescente :

$$(9)\ Q_{Secl} = 1{,}25\ P$$

Lampe incandescente :

$$(10)\ Q_{Secl} = P$$

Où,

- P = puissance de la lampe (W).

Les 25 % supplémentaires pour la lampe fluorescente représentent la chaleur dégagée par le ballast électromagnétique.

Tableau 5.11 : Chaleur dégagée par l'éclairage

Destination du local ou type d'activité	Puissance raccordée [W/m²]	
	Lampe à incandescence	Lampe fluorescente
Entrepôt, habitat, restaurant, théâtre	25	8
Bureau, salle de cours, hall d'entrée avec caisse de guichet	65	16
Salles de lecture, d'ordinateurs, laboratoire, magasin, hall d'exposition	110	24
Supermarché, très grand bureau, amphithéâtre sans fenêtre, travaux de précision		45

Apport de chaleur par les machines et appareillages $Q_{Séquip.}$ (W)

La majorité des appareils sont des sources de chaleur latente et sensible, dans des proportions qui dépendent cependant de leurs durées d'utilisation (coefficient de pondération). Il est, par exemple, estimé qu'un appareil ne fonctionnant qu'une demi-heure par jour dégagera la moitié de sa puissance électrique nominale en apport de chaleur[9].

Tableau 5.12 : Apports de chaleur par appareils électriques (d'après les indications de divers fabricants, 2006)

Types d'appareils	Puissance nominale [W]	Gain à admettre [W]	
		Chaleur sensible	Chaleur latente
Friteuse 5 litres d'huile	2575	464	696
Friteuse 10l d'huile	6954	1102	1653
Chauffe pains	435	319	29
Moules à gaufrettes	2192/719	899/319	609/203
Percolateur 2l	993	394	104
Chauffe-eau	146	116	29
Cuisine électrique et machine à laver	3000	1450	1550
Aspirateur	200	50	
Essoreuse	100	15	
Congélateur 200l	175	500	
Fer à repasser	500	230	270
Chaîne stéréophonique	40	40	0
Téléviseur	175	175	0
Séchoir à cheveux	500/1000	175/350	75/250
Plaque de cuisson	500/1000	120/250	130/250
Grill à viande	3000	1200	300
Stérilisateur	150	175	325
Ordinateur	400	250	0
Cafetière	500/3000	750	300
Photocopieuse		750	
Imprimante à jet d'encre		52	
Imprimante laser		15	
Fax		62	

Source : IEPF, 2006.

9. IEPF, 2006, p. 19.

5.1.2.2 Charges thermiques totales[10]

Les charges thermiques totales QT (W) représentent la somme des charges externes et internes et peuvent être découpées en charges sensibles totales et en charges latentes totales.

$$(11)\ Q_T = Q_S + Q_L$$

Charges sensibles totales Q_S (W) :

$$(12)\ Q_S = Q_R + Q_M + Q_V + Q_{Sr} + Q_{Soc} + Q_{Sécl} + Q_{Séquip}$$

Charges latentes totales Q_L (W) :

$$(13)\ Q_L = Q_{Lr} + Q_{Loc} + Q_{Léquip}$$

Ces charges devront être prises comme base pour le dimensionnement et le choix des installations.

5.1.3 Puissance du climatiseur et de déshumidification[11]

5.1.3.1 Puissance du climatiseur

La puissance frigorifique du climatiseur dépend des charges thermiques totales Q_T qu'il faut compenser et est inscrite dans les catalogues constructeurs. Dans le cas contraire, il est possible d'utiliser la notion de coefficient d'efficacité frigorifique (COP_{Froid}) dont les valeurs sont généralement connues :

$$(14)\ COP_{Froid} = P\ f / P\ a$$

Où,

- P f = puissance frigorifique (W)
- P a = puissance absorbée (W)

D'où la puissance absorbée par le compresseur : $P\ a = P\ f / COP_{Froid}$

À titre indicatif les coefficients de performance des climatiseurs monoblocs et splits (voir la description des modèles ci-après) sont de l'ordre de 2 à 2,5, une puissance frigorifique de 1 kW permettra ainsi au compresseur d'extraire de 2 à 2,5 kW de chaleur au local.

5.1.3.2 Puissance de déshumidification

En milieu tropical chaud et humide, la sensation d'inconfort peu également venir d'une humidité trop élevée même à température modérée. Il est donc important de tenir compte de la déshumidification de l'air local dans le choix du système d'air conditionné. Les deux critères à considérer en priorité sont donc :

- La puissance du climatiseur ou charge calorifique totale en Watt,

10. IEPF, 2006, pp. 20-22.

11. IEPF, 2006 pp. 22-24.

- La puissance de déshumidification ou chaleur latente totale exprimée en Watt ou en kg d'eau/heure (quantité d'eau pouvant être retenue par le climatiseur), fournie généralement par le fabricant.

5.1.3.3 Coefficient de sécurité

La valeur adoptée en tant que coefficient de sécurité varie en fonction de la confiance apportée au bilan thermique effectué du bâtiment, et se situe généralement entre 0 et 5 %. Il faudra néanmoins éviter d'accroître ce coefficient au-delà, sous peine de risquer de sur-dimensionner les équipements et d'accroître inutilement les coûts.

5.2 Choix du système

Si le bilan thermique permettra de définir la puissance optimale du système, il conviendra également d'opter pour la technologie la plus adaptée aux besoins des occupants du bâtiment (voir encadré 5.2). Ces technologies peuvent être séparées notamment entre :

- Systèmes centralisés en tout-air ;
- Systèmes centralisés air-eau et tout-eau ;
- Les climatiseurs de local (individuels), y compris les systèmes splits.

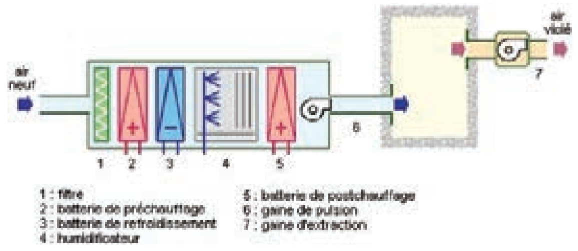
5.2.1 Installations centralisées tout-air

Les installations tout-air peuvent être divisées en systèmes à débit d'air constant ou variable, avec un ou plusieurs conduits.

5.2.1.1 Système à débit d'air constant à un seul conduit

Dans ce système, l'air est utilisé comme gaz caloporteur de froid pour moduler la température et l'humidité des espaces internes. Il est préparé dans un caisson de traitement avant d'être envoyé vers les espaces intérieurs via des bouches de soufflage. Le débit d'air est fixé par un ventilateur à vitesse unique : la régulation de la température se fait donc directement en modifiant les caractéristiques thermiques de l'air entrant (via les batteries de chauffage ou refroidissement). Le traitement peut-être unizone (ci-dessus) ou multizone, où l'air provenant d'une même centrale est insufflé dans plusieurs locaux, comme illustré ci-après.

Illustration 5.4 : Centrale à un seul conduit à débit d'air constant



Source : Université catholique de Louvain, Site Energie + (consultation novembre 2014).

Encadré 5.2 : Choix du système de climatisation

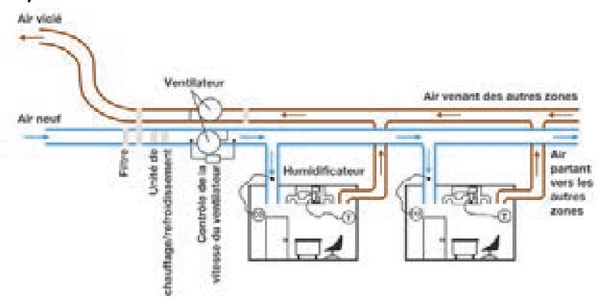
Le choix du système de climatisation le plus adapté dépendra du type de bâtiment et des besoins. Le tableau ci-dessous fournit quelques critères de sélection entre une installation centralisée, multi-split et individuelle.

Tableau 5.13 : Critères de sélection du système de climatisation

	Climatisation centralisée	Multi-split	Individuelle
Utilisation	Industrielle	Professionnelle	Grand public
Durée de vie moyenne	20 ans	12 à 15 ans	7 ans
Déshumidification	Faible, filtration de l'air	Bonne	Bonne
Technicité d'installation	Importante	Moyenne à importante	Limitée
Esthétique/ encombrement	Local technique, condenseur extérieur, unité intérieure intégrable	Unité extérieure en toiture ou intégrable au local technique, unité intérieure intégrable	Unité extérieure en façade ou en toiture, unité intérieure apparente
Nuisances sonores	Zones techniques	Déportées en toitures ou autres	Près de l'unité extérieure
Puissance	À partir de 10 unités intérieures, possibilité de stockage de froid	De 16 à 64 unités intérieures (5 à 100kW)	Inférieure à une dizaine de kW, surpuissance pouvant aller jusqu'à 60 %
Maintenance	Hors locaux occupés, nombre plus élevé de composants, risques de condensation	Hors locaux occupés	En locaux occupés + mise en régime rapide
Commande locale	Réglage local des vitesses de ventilateurs, régulation de la température d'eau de départ	Réglage des vitesses des unités intérieures, application précise aux besoins de froid	Réglage des vitesses des unités intérieures, application précise aux besoins de froid

Source : Solener, ADEME, 2014.

Illustration 5.5 : Système multizone



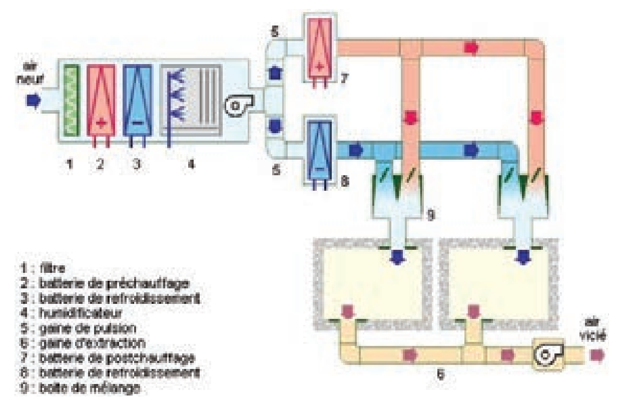
Source : ENERGIES 2050, d'après www.buildingscience.com (consultation novembre 2014).

Points de repère

5.2.1.2 Les systèmes à débit d'air constant, deux conduits

À double conduit, ou double gaine, la centrale de refroidissement prépare deux niveaux de températures de l'air avec des réseaux de distribution séparés vers les locaux. Cela permet notamment d'avoir plus de flexibilité et d'obtenir un confort différencié dans les différentes pièces climatisées.

Illustration 5.6: Centrale à deux conduits à débit d'air constant

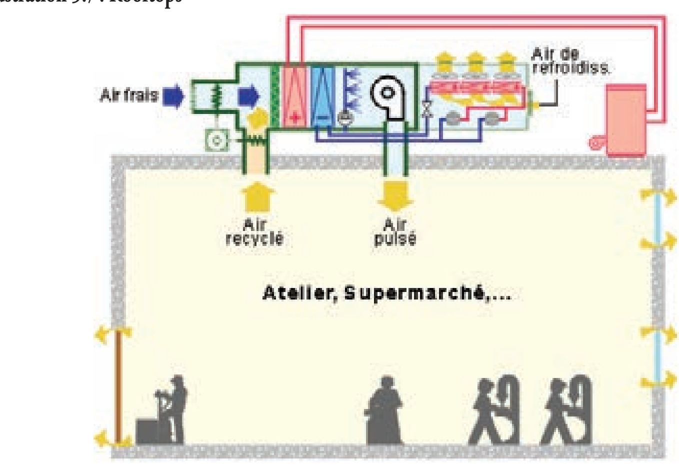


Source: Université catholique de Louvain, Site Energie + (consultation novembre 2014).

5.2.1.3 Unités de toitures

Installés à l'extérieur du bâtiment (et donc devant intégrer une protection contre les aléas climatiques), les rooftops sont des centrales unizones à détente directe fréquemment utilisées pour climatiser de grandes salles (bureaux, supermarchés, halls, etc.), ou en climatisation industrielle.

Illustration 5.7: Rooftops



Source: IEPF, 2006.

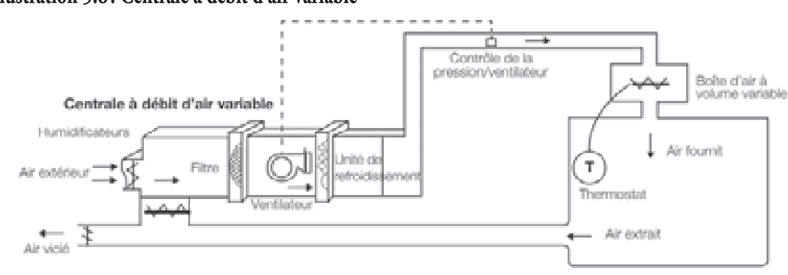
Ces systèmes présentent l'avantage d'être faciles à installer, ils n'encombrent pas et disposent également d'une régulation simple et centralisée, avec variabilité du débit d'air et de la puissance délivrée. Ils amènent en revanche généralement des coûts élevés tant en consommation énergétique que dans l'installation.

5.2.1.4 Les installations tout-air à débit variable

À l'inverse des systèmes précédents, un système à débit d'air variable module les conditions de températures intérieures non pas en changeant les caractéristiques thermiques de l'air entrant mais en modifiant son débit. Celui-ci varie donc entre le minimum requis pour assurer le renouvellement d'air et un maximum qui dépend des charges frigorifiques du local (gains externes et internes).

Ce système est constitué d'une centrale de traitement d'air, de réseaux de conduits et de diffuseurs d'air permettant la répartition de l'air soufflé. Les bouches de soufflage doivent par ailleurs tenir compte de la plage de débits possibles[12].

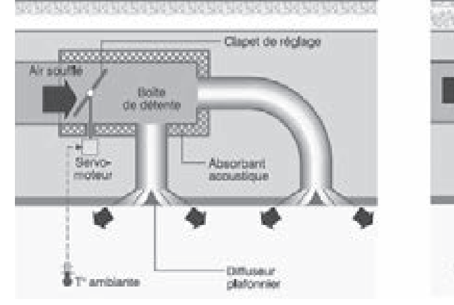
Illustration 5.8 : Centrale à débit d'air variable

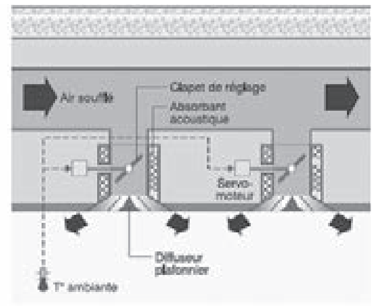


Source : ENERGIES 2050, d'après Ahmadul Ameen, 2005.

Le débit peut par exemple être régulé pour chaque pièce par un clapet commandé par un thermostat d'ambiance ou un servomoteur. Ce clapet peut être installé directement au niveau des boîtes de détente (gauche) ou au niveau des diffuseurs.

Illustration 5.9 : Réglage d'un clapet au niveau des boîtes de détente et des diffuseurs





Source : IEPF, 2006, p. 100.

12. IEPF, 2006, p. 98.

Le tableau ci-dessous résume quelques critères de choix des systèmes de climatisation centralisée à air.

Tableau 5.14 : Comparatif des avantages/inconvénients et applications des systèmes tout-air

Système	Avantages	Inconvénients	Exemples types d'application
Système à débit d'air constant, un conduit	• Simplicité d'installation et dans les réglages de fonctionnement • Coûts de maintenance réduits • Faible nuisance sonore • Contrôle de l'humidité relative en centrale	• Débit constant : manque de flexibilité • Consommation élevée du ventilateur • Encombrement de l'installation	Intérêt surtout si un seul espace de gros volume à climatiser ou plusieurs locaux avec mêmes charges thermiques
Système à débit d'air constant, deux conduits	• Adaptation des charges selon les locaux • Réactivité du système • Contrôle de l'humidité relative en centrale	• Coûts d'exploitation • Débit constant : manque de flexibilité • Consommation élevée du ventilateur • Encombrement de l'installation	Locaux avec hauts débits d'air et fortes variabilités entre les zones, notamment secteur industriel
Rooftop	• Permet de traiter de gros volumes d'air sans pour autant encombrer la surface au sol • Rapide à mettre en œuvre • Efficacité énergétique*	• Coûts à l'exploitation très élevés à cause des ventilateurs • Débit constant : manque de flexibilité	Grandes salles de bureaux ou d'ordinateurs, halls recevant du public, grands magasins, supermarchés, restaurants, ateliers, climatisation industrielle
Système à débit variable	• Taille de la centrale de traitement diminuée comparée à un débit constant, économie d'investissement • Plus faible consommation du ventilateur • Avantage acoustique avec grande vitesse de ventilateur seulement lorsque c'est nécessaire	• Réglage du débit d'air moins aisé que celui d'une température • Coûts d'installation élevés • Encombrement	Essentiellement justifié lorsqu'un renouvellement d'air important est nécessaire comme dans les bureaux paysagers et les salles de conférence

Source : Basé sur sources IFDD, 2006, Université Catholique de Louvain et Portail expert de la consommation énergétique (consultation des sites novembre 2014).

5.2.2 Les systèmes centralisés à eau ou air-eau

L'eau est ici utilisée comme élément caloporteur, l'air continuant néanmoins d'être pulsé pour assurer les minimums hygiéniques de renouvellement. Nous allons présenter ci-dessous cinq types principaux d'installations centralisées de climatisation à eau :

- Les systèmes à ventilo-convecteurs,

- les systèmes avec éjecto-convecteurs,
- les plafonds froids,
- les planchers, et
- les poutres rafraîchissantes.

Ces systèmes sont en général plus souples et permettent d'obtenir des niveaux de confort plus élevés à des coûts d'exploitation inférieurs qu'en tout-air, mais avec des frais d'installation supérieurs. Les économies au niveau des coûts d'exploitation concernent essentiellement le ventilateur puisque le transfert du froid se fait ici par pompe à eau.

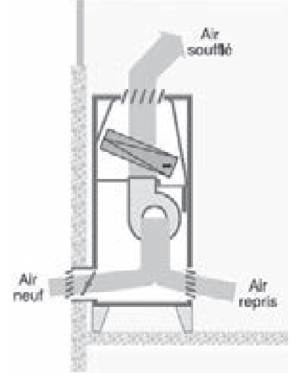
5.2.2.1 Systèmes à ventilo-convecteurs

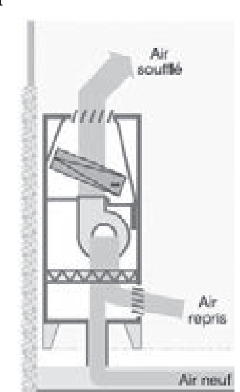
Ce système est basé sur la distribution d'eau glacée et d'eau chaude dans des batteries incorporées à un équipement, le ventilo-convecteur, installé dans la pièce à climatiser. Celui-ci est également équipé d'un ventilateur qui permet de souffler de l'air repris ou mélangé dans la pièce. La ventilation pour renouvellement d'air (hygiénique) est assurée ici par une décharge d'air pulsé tandis que la régulation de température est réalisée grâce au transfert thermique entre l'eau chaude/froide et l'air repris (ou neuf) au sein des ventilo-convecteurs.

Illustration 5.10 : Fonctionnement d'un ventilo-convecteur

Source : IEPF, 2006, p. 103.

Illustration 5.11 : Modes d'alimentation en air neuf d'un ventilo-convecteur

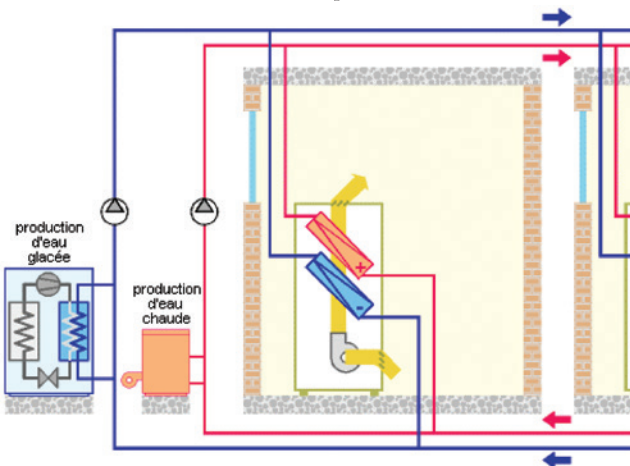





Source : IEPF, 2006, p. 103.

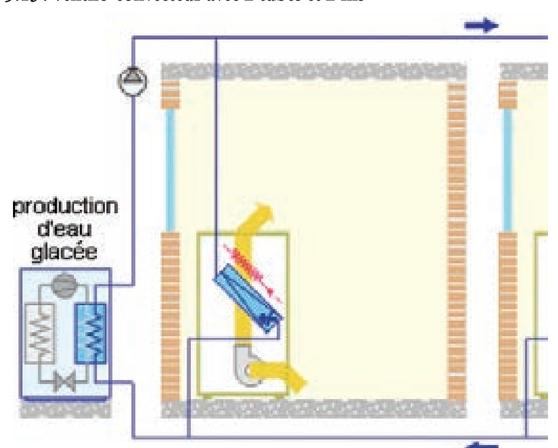
Les ventilo-convecteurs peuvent se présenter sous différentes formes : avec 2 tubes (un seul échangeur), 4 tubes (deux échangeurs), 2 tubes et 2 fils avec uniquement une alimentation en eau glacée ou 2 tubes réversibles (eau chaude ou eau glacée selon les besoins) et 2 fils. En climat tropical, l'air conditionné sera principalement utilisé pour des motifs de refroidissement ; un système 2 tubes et 2 fils peut donc être conseillé et permettra des économies de coûts d'installation.

Illustration 5.12 : Fonctionnement d'une climatisation par ventilo-convecteur à 4 tubes



Source : Université Catholique de Louvain, Site Energie+ (consultation novembre 2014).

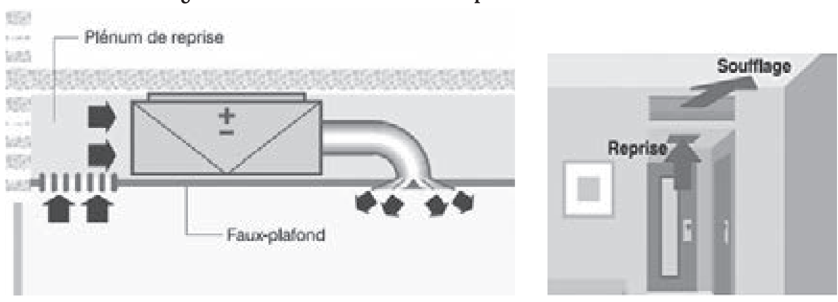
Illustration 5.13 : Ventilo-convecteur avec 2 tubes et 2 fils



Source : Université Catholique de Louvain, Site Energie+ (consultation novembre 2014).

Ces systèmes présentent de nombreux avantages notamment en termes de coûts et de flexibilité d'utilisation, et sont à ce titre les plus utilisés en climatisation centrale. Le ventilo-convecteur peut par ailleurs être monté au-dessus d'un faux plafond afin de préserver l'espace du local.

Illustration 5.14 : Intégration du ventilo-convecteur à faux plafond

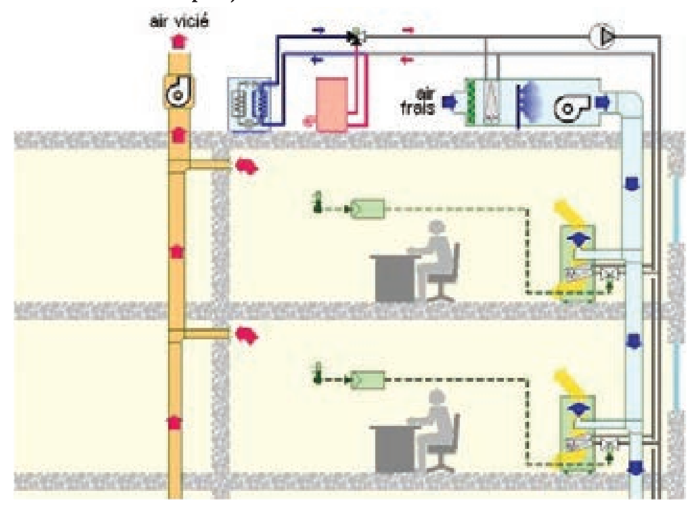


Source : Université Catholique de Louvain, Site Energie+ (consultation novembre 2014).

5.2.2.2 Systèmes à éjecto-convecteurs

Comme le ventilo-convecteur, l'éjecto-convecteur utilise le réseau d'eau pour les transferts thermiques et l'air pour la partie hygiène.

Illustration 5.15 : Climatisation par éjecto-convecteurs



Source : Université Catholique de Louvain, Site Energie+ (consultation novembre 2014).

La différence est ici que l'air primaire provenant de la centrale, pulsé à haute vitesse (15 à 25m/s)[13], va induire un passage d'air secondaire à travers les batteries d'eau du convecteur, amenant un échange thermique par induction. Ce système reste néanmoins très peu utilisé dans les pays chauds et en développement, en partie à cause d'un manque de souplesse quant à son installation et à son fonctionnement nécessitant de pulser en permanence de l'air primaire à haut débit.

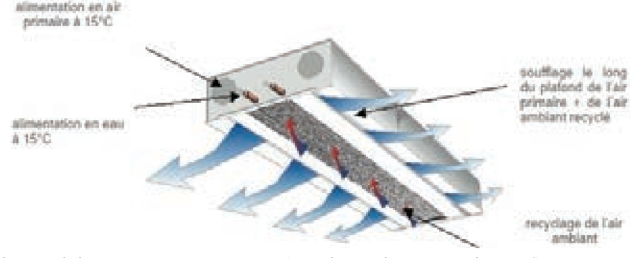
13. IEPF, 2006, p. 101.

5.2.2.3 Les poutres froides

Les poutres froides sont parcourues par de l'eau à température variable, entre 15 et 19°C selon les besoins en refroidissement du local. L'échange se fait par convection naturelle entre les poutres et l'air ambiant.

Dans le système passif, l'air chaud (réchauffé par exemple par les occupants ou les machines) remonte vers les poutres à cause de sa flottabilité plus élevée, se refroidit en traversant l'échangeur et redescend lorsqu'il est plus frais.

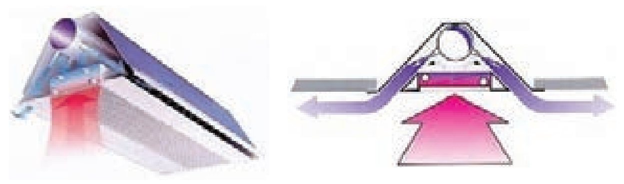
Illustration 5.16 : Poutres froides



Source : Portail expert de la consommation énergétique (consultation du site novembre 2014).

Les poutres dites actives font également intervenir le renouvellement d'air « hygiénique » en le faisant passer par des petites tuyères, renforçant ainsi la convection dans l'échangeur grâce au processus d'induction.

Illustration 5.17 : Poutres actives



Source : Portail expert de la consommation énergétique (consultation du site novembre 2014).

5.2.2.4 Les plafonds rayonnants froids

Les plafonds froids présentent un fonctionnement relativement similaire : de l'eau froide (15°C environ) circule via des canalisations fixées au-dessus de la partie métallique des faux plafonds, tel qu'illustré ci-contre.

Illustration 5.18 : Plafond froid



Source : Elemental building (consultation du site novembre 2014).

Les échanges de chaleur se font ici soit par convection avec l'air ambiant, soit par rayonnement. La puissance de telles installations reste cependant limitée (60 à 120W/m²)[14] et correspond donc

14. Portail expert de la consommation énergétique (consultation du site novembre 2014).

mieux à des utilisations en climats tempérés, malgré des avantages certains (faible consommation énergétique, peu encombrant).

5.2.2.5 Les planchers rafraîchissants

Le principe est de faire circuler de l'eau froide (ou pour certains systèmes un fluide frigorigène) au travers de tuyauteries placées sous les dalles du plancher. L'eau peut être refroidie par processus naturels (via pompage dans la nappe phréatique, refroidissement par les sols) ou via une machine frigorifique traditionnelle, à une température qui ne doit pas excéder 16°C afin d'éviter la condensation. Tout comme les plafonds froids, ce système n'est ni bruyant ni encombrant, mais les risques de condensation et la mise en régime lente liée à l'inertie du plancher en font un outil peu efficace lorsque les charges frigorifiques sont élevées.

Illustration 5.19 : Plancher froid



Source : Rehau, disponible via http://www.climamaison.com/conseil-expert/plancher-rafraichissant.htm (consultation novembre 2014).

Tableau 5.15 : Récapitulatif des avantages/inconvénients des systèmes à eau

Système	Avantages	Inconvénients
Ventilo-convecteur	Coûts et flexibilité d'utilisation. Préserve le local si monté en faux plafond	Bruit, possible encombrement Puissance plus faible qu'un éjecto-convecteur
Éjecto-convecteur	Apport d'air neuf séparé de l'apport thermique Maintenance	Manque de souplesse à l'installation et dans son fonctionnement Nécessite de pulser en permanence de l'air primaire à haut débit entraînant une haute consommation
Poutres rafraîchissantes Plafond froid Plancher froid	Faible consommation énergétique, pas d'encombrement ni de bruit	Peu de puissance frigorifique, risques de condensation

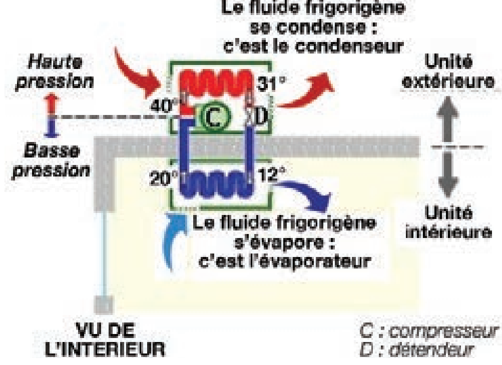
5.2.3 Climatiseurs individuels

Le choix d'un climatiseur individuel (ou climatiseur de local) peut s'avérer judicieux notamment lorsque le bilan thermique des différentes parties du bâtiment a révélé des besoins très localisés ou de grandes variations entre les différents locaux. Ces systèmes présentent également l'avantage d'éviter les coûts liés à l'installation d'un système centralisé, offrent plus de flexibilité et de contrôle, un fonctionnement relativement aisé et une mise en route ne nécessitant dans certains cas qu'un raccordement électrique au secteur. En revanche, le bruit, la possibilité de courants d'airs et l'impact esthétique sont des facteurs à considérer avant d'opter pour ce type de technologie.

5.2.3.1 Principes de fonctionnement

Le principe d'un climatiseur est d'utiliser une machine frigorifique afin d'extraire la chaleur du local à traiter : le fluide frigorigène s'évapore et capte la chaleur à l'intérieur avant de se condenser et de relâcher cette chaleur à l'extérieur du bâtiment.

Illustration 5.20 : Principe schématique d'un climatiseur de local



Source : Université Catholique de Louvain, Site Energie + (consultation novembre 2014).

Tout comme les systèmes centralisés, les climatiseurs de local se présentent avec des condenseurs tout-air ou à eau.

5.2.3.2 Les condenseurs à air

Les armoires compactes de climatisation

Ce système s'installe directement dans le local à climatiser et est composé d'un filtre, d'une batterie froide, d'une batterie chaude électrique ou à eau, d'un humidificateur et d'un ventilateur centrifuge. Sa puissance frigorifique varie de 4 à 120kW mais son installation directement dans le local peut poser des problèmes de confort auditif.

Illustration 5.21 : Armoire compacte de climatisation

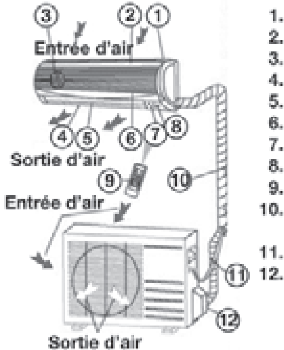


Source : Université Catholique de Louvain, Site Energie + (consultation novembre 2014).

Armoires à condenseur à air séparé (split system)

Le condenseur et le compresseur sont ici séparés de l'armoire et installés à proximité en extérieur. Ils sont reliés à l'armoire par une tuyauterie où circule du fluide réfrigérant. La puissance du système va de 12 à 220kW. Plusieurs variantes d'installations sont réalisables.

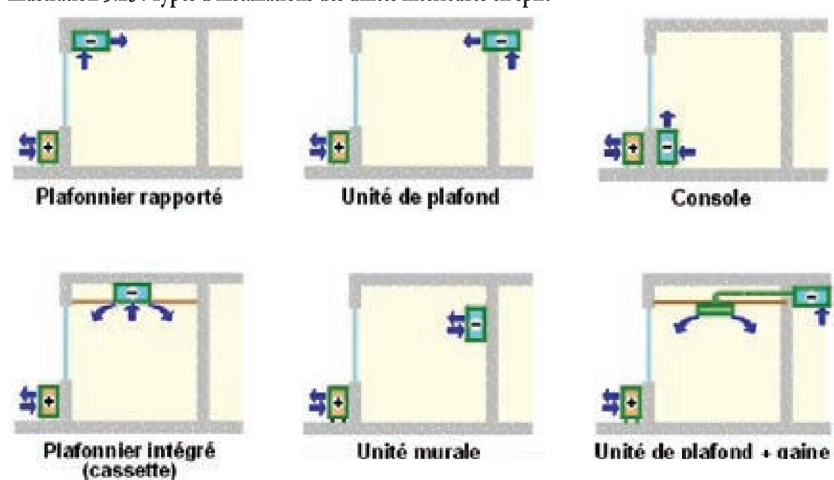
Illustration 5.22 : Climatiseur split system



1. Châssis panneau avant
2. Panneau avant
3. Filtre à air
4. Grille de soufflage
5. Ailettes d'orientation du flux d'air
6. Sonde de température ambiante
7. Afficheur
8. Récepteur infrarouge
9. Télécommande
10. Gaine de connexion avec l'unité extérieure (tubes aller/retour du fluide frigorigène + liaison électrique + isolant thermique)
11. Câble de connexion
12. Vannes d'arrêt

Source : www.climatisation.ch (consultation novembre 2014) (illustration partiellement redessinée par ENERGIES 2050).

Illustration 5.23 : Types d'installations des unités intérieures en split



Source : Université Catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

Conseils pour l'emplacement de l'unité extérieure

Afin de ne pas nuire à l'efficacité énergétique du système et à l'esthétique du bâtiment, quelques règles sont à respecter[15] :

- Placer le condenseur dans des zones protégées du soleil, une trop grande exposition nuira à sa capacité à évacuer la chaleur ;
- Utiliser les vents dominants pour faciliter l'évacuation de l'air du condenseur (une évacuation contre les vents nuirait à l'efficacité globale du système) ;
- Placer le condenseur dans un endroit facilement accessible, notamment pour les entretiens ;
- Éviter le placement du condenseur au sol et le mettre à l'abri des poussières, des feuilles mortes, de la terre ;
- Rendre les condenseurs les moins visibles possibles afin de ne pas nuire à l'esthétique du bâtiment.

Tableau 5.16 : Intégration de l'unité extérieure dans l'architecture du bâtiment

Type d'installation	Représentation graphique	Remarques
Installation en toiture terrasse		Protection contre aléas climatiques nécessaire, bon échange thermique, protection à la vue par parapets par exemple
Installation sous toiture inclinée		Bonne protection contre la pluie, possibilité de pose de silentblocs, assurer échanges thermiques sous le vent
Sur façade verticale		Bon échange thermique (en environnement urbain non confiné), prévoir une protection contre aléas climatiques, transmission du bruit et flux de chaleur à considérer

Source : Solener, ADEME, 2014.

Les appareils installés en toitures

Les rooftops ont déjà été évoqués précédemment et peuvent être utilisés en usage individuel. Ils ont des capacités allant de 7 à 350Kw.

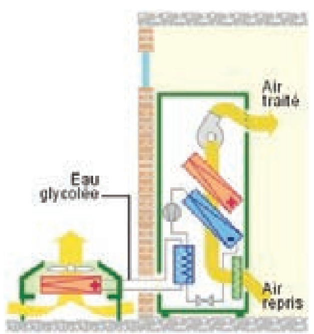
15. IEPF, 2006.

5.2.3.3 Les condenseurs à eau

L'aéro-refroidisseur

Le condenseur est ici refroidi par de l'eau glycolée[16], elle-même refroidie dans un échangeur à air, et le système est équipé d'un ou plusieurs ventilateurs ayant pour but d'accélérer le refroidissement. Ces systèmes présentent néanmoins des performances moyennes, liées en particulier au réchauffement de la boucle d'eau sous l'effet de températures extérieures élevées.

Illustration 5.24 : Système aéro-refroidisseur

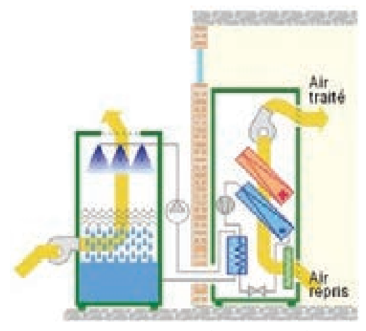


Source : Université Catholique de Louvain, site Energie+ (consultation novembre 2014).

Climatisation avec tour de refroidissement ouverte

Ce système offre des rendements plus élevés en pulsant l'eau de refroidissement du condenseur à contre-courant du débit d'air extérieur. L'échange entre les deux entraîne une vaporisation de l'eau qui se refroidit et est ensuite conduite vers le condenseur se trouvant près du compresseur. Ce système est plus efficace mais l'ouverture de la tour à l'oxygène extérieur peut néanmoins poser des problèmes de corrosion.

Illustration 5.25 : Tour de refroidissement ouverte



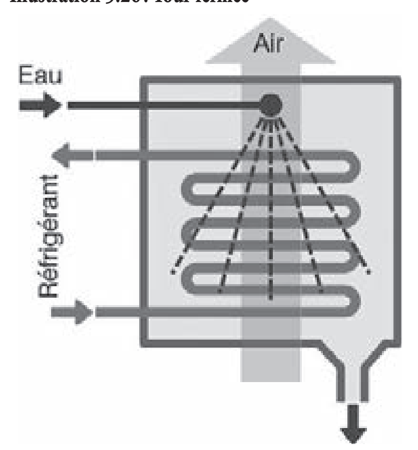
Source : Université Catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

16. Eau enrichie en glycol, pour éviter notamment son gel dans les conduits.

Climatisation avec tour de refroidissement fermée

En réponse aux problèmes de corrosion posés par une tour ouverte, l'eau venant du condensateur n'est ici plus en contact avec l'extérieur. Les conduits qu'elle traverse sont arrosés par un jet d'eau de refroidissement, eau qui elle-même va se refroidir en s'évaporant partiellement. La tour fermée peut finalement être refroidie par l'air extérieur pulsé par des ventilateurs (dry cooler).

Illustration 5.26 : Tour fermée



Source : IEPF, 2006, p. 90.

Illustration 5.27 : Dry cooler



Source : IEPF, 2006, p. 90.

> **Encadré 5.3 : Systèmes à air vs systèmes à eau**
>
> L'utilisation de condenseurs à eau est particulièrement recommandée en cas de proximité d'une source naturelle (rivière, lac, puits) dans laquelle il sera possible de puiser l'eau nécessaire au processus. La température de cette eau doit également être compatible avec les conditions de fonctionnement prévues car cela impactera les performances du condenseur et les coûts globaux d'exploitation.
>
> En règle générale, les condenseurs à eau présentent de meilleurs rendements, sont moins encombrants, moins bruyants, et le débit d'eau de refroidissement peut aisément être contrôlé. À l'inverse, les condenseurs à air sont plus économiques avec un entretien plus facile. Ils économisent l'eau avec la suppression des canalisations hydrauliques et donc ne présentent pas les mêmes problèmes de corrosion et d'entartrage.

5.2.3.4 Autres critères de sélection d'un climatiseur individuel : efficacité énergétique et acoustique

L'efficacité énergétique du climatiseur peut être définie comme le rapport entre l'énergie frigorifique fournie et l'énergie électrique consommée. Cet indicateur est appelé Coefficient de Performance Frigorifique.

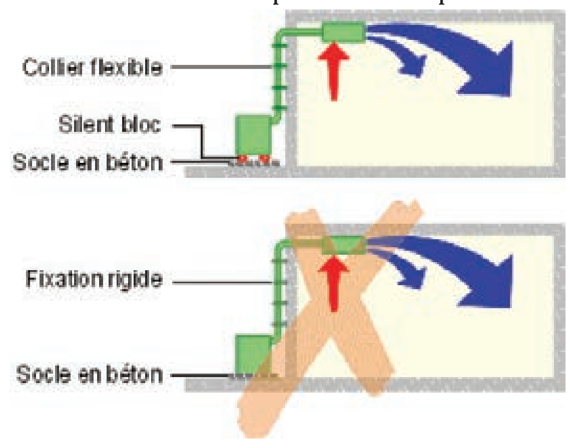
COP_{Froid} = puissance frigorifique (Watt)/puissance compresseur (Watt)

Un rendement plus élevé permettra d'économiser de l'énergie, à charges frigorifiques égales.

Acoustique

En terme d'acoustique, un climatiseur individuel peut s'avérer assez bruyant même lorsque les équipements sont situés à l'extérieur du local (condenseur situé près d'une fenêtre, ou transferts de vibrations). Ces effets peuvent être atténués au montage de l'unité extérieure, tel qu'illustré ci-dessous.

Illustration 5.28 : Installation du climatiseur d'un point de vue acoustique



Source : Université Catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

Ici la mise en place d'un collier flexible et d'un silentbloc entre l'unité extérieure (schéma du haut) permet de réduire les vibrations et les bruits comparativement à une installation basique (schéma du bas). Le niveau de pression acoustique effectif au niveau de l'occupant peut être calculé en utilisant l'équation suivante :

(15) $Lp = Lw - 5 \log V - 10 \log r + 3$[17]

Où,

- Lp = niveau de pression acoustique au point choisi en décibel A (dB(A)) ;

17. IEPF, 2006, p. 90.

- Lw = Niveau de puissance acoustique de la source sonore (du climatiseur, disponible dans la notice de l'appareil) en dB(A) ;
- V = volume de la pièce en m^3;
- r = distance de la source sonore au point choisi en mètres.

Différentes méthodes permettent de réduire le niveau sonore d'un climatiseur notamment[18] :

- Placer des supports antivibratoires ;
- Limiter le bruit des pompes (manchons antivibratoires, vitesse du fluide dans la pompe réduite) ;
- Empêcher les bruits de vibrations, notamment avec des liaisons flexibles ;
- Améliorer l'acoustique des conduits d'air (par exemple en insérant une gaine absorbante entre local et source sonore) ;
- Doublage acoustique des parois.

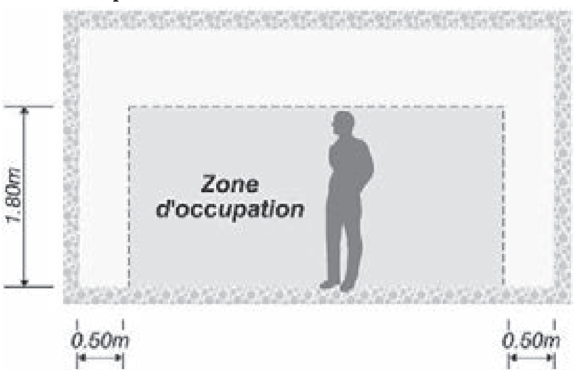
À noter qu'un climatiseur de fenêtre offre de ce point de vue de faibles performances en transmettant toutes les vibrations sonores vers le local.

5.2.3.5 Choix de la disposition dans le local

Position de la bouche de soufflage

La bouche de soufflage doit se situer en dehors de la zone d'occupation afin d'éviter que le jet d'air ne touche les occupants avant son mélange à l'air ambiant.

Illustration 5.29 : Zone d'occupation dans un bureau, normes Eurovent

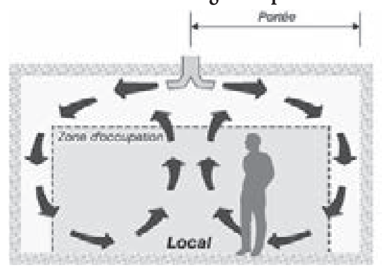


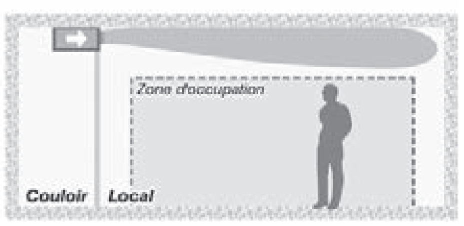
Source : IEPF, 2006, p. 89.

Un soufflage sous plafond est favorable afin d'éviter la stratification de l'air sous l'effet de convection et de flottabilité de l'air chaud. Dans ce cas, l'emplacement des parois ne doit pas entraver la circulation de l'air dans les locaux.

18. IEPF, 2006, p. 60.

Illustration 5.30 : Soufflage sous plafond



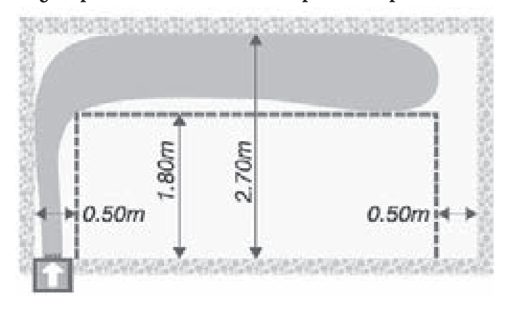


Source : IEPF, 2006.

D'autre part, le placement devra se faire en fonction de la vélocité moyenne de l'air sortant du climatiseur, qui dispose en général de trois vitesses. Il s'agit ici d'éviter qu'à vitesse réduite, l'air ne retombe sur les occupants et crée une situation d'inconfort.

La distribution de l'air peut par ailleurs se faire en soufflage depuis le sol. Dans ce cas on évitera les obstructions telles que les rideaux, les tablettes ou la présence d'occupants à proximité. Les systèmes posés latéralement et à soufflage horizontal sont ceux susceptibles de créer le plus d'inconfort. Il sera enfin important de vérifier les méthodes d'évacuation des condensats.

Illustration 5.31 : Soufflage depuis le sol, avec zone d'occupation (en pointillé)



Source : IEPF, 2006.

Illustration 5.32 : Soufflage latéral

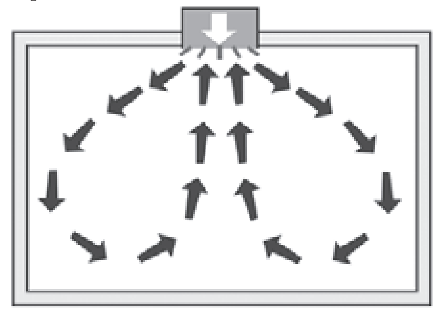


Source : IEPF, 2006.

Position de la bouche de reprise

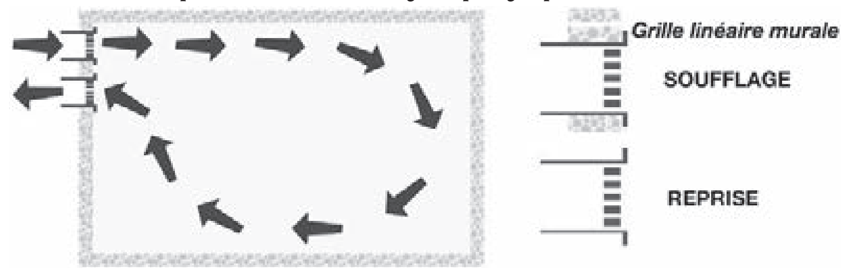
Le brassage peut être amélioré en plaçant les bouches de soufflage et de reprise proches l'une de l'autre, en utilisant par exemple un diffuseur plafonnier circulaire (illustration ci-dessous) où l'air est soufflé par les cônes extérieurs et évacué en partie centrale. Sur un faux plafond équipé, la reprise peut également s'effectuer au travers de luminaires encastrés, ce qui diminue in fine les charges thermiques du local et allonge la durée de vie des lampes. Les reprises au sol sont à éviter car la poussière finit par s'y accumuler.

Illustration 5.33 : Diffuseur plafonnier circulaire



Source : IEPF, 2006, p. 79 (illustration redessinée par ENERGIES 2050).

Illustration 5.34 : Disposition latérale avec soufflage et reprise groupés



Source : IEPF, 2006, p. 80 (illustration redessinée par ENERGIES 2050).

Les illustrations ci-après donnent un aperçu des avantages et inconvénients de différents types de configurations.

Illustration 5.35 : Avantages et inconvénients de différents types de configurations

Avantages	Configurations	Inconvénients
• Distribution optimale de l'air • Bruit réduit • Faux plafond mis à profit • Multiplicité des combinaisons		• Risque de court-circuit si les bouches sont trop rapprochées
• Distribution optimale de l'air • Bruit réduit • Faux plafond mis à profit		• Difficulté d'évacuation des condensats (nécessité d'une pente)
• Fonctionnement correct en chauffage et en refroidissement		• Risque de court-circuit si vitesse de soufflage trop faible • Encombrement au sol • Difficulté d'évacuation des condensats (nécessité d'une pente)
• Distribution optimale de l'air froid en pluie • Encombrement au sol nul		• Stratification des températures en mode chauffage • Risque de gradient horizontal des températures
• Encombrement au sol nul		• Court-circuit en mode chauffage • Stratification des températures en mode chauffage • Vitesse de l'air trop souvent élevée dans l'espace occupé
• Unité en colonne destinée au grand volume		• Inconfort à hauteur d'homme à proximité • Risque de court-circuit • Risque de gradient horizontal des températures

Source : IEPF, 2006.

Mécanismes de régulation :

Régulation du thermostat d'ambiance

L'emplacement du thermostat d'ambiance qui régule le fonctionnement du compresseur doit se faire dans un endroit qui est représentatif de la température moyenne du local, à l'abri des sources chaudes ou froides (lampes, fenêtres, zones de soufflage par exemple). Cela peut s'ajouter à un programme intelligent de marche en fonction de l'occupation et à une facilité d'utilisation du thermostat.

Choix de la température de consigne

Le choix de la température de consigne doit idéalement évoluer en fonction des températures extérieures, avec une différence maximum de 6°C. Cela permettra, notamment, d'économiser de l'énergie et d'éviter les chocs thermiques.

Entretien régulier

Suivre les préconisations du constructeur en matière d'entretien, notamment des filtres.

5.3 Autres systèmes de refroidissement

D'autres méthodes de refroidissement moins traditionnelles peuvent être exploitées en bâtiment tropical. Nous en présentons quelques-unes ci-dessous.

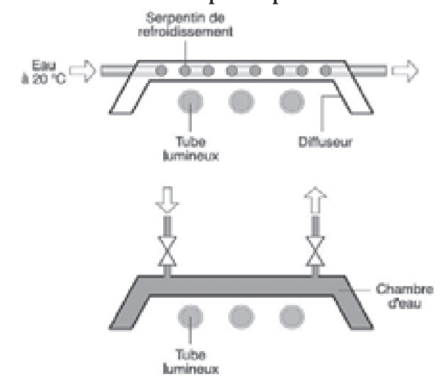
5.3.1 Refroidissement des luminaires

Environ 70 % de la chaleur totale dissipée par les luminaires peut être évacuée par de l'eau non refroidie qui s'échauffe de 5°C. Le principe est basé sur l'utilisation de tubes liés et d'une chambre d'eau entourant le luminaire.[19]

Illustration 5.36 : Refroidissement des luminaires

Source : IEPF, 2006.

Illustration 5.37 : Refroidissement des luminaires par eau pulsée



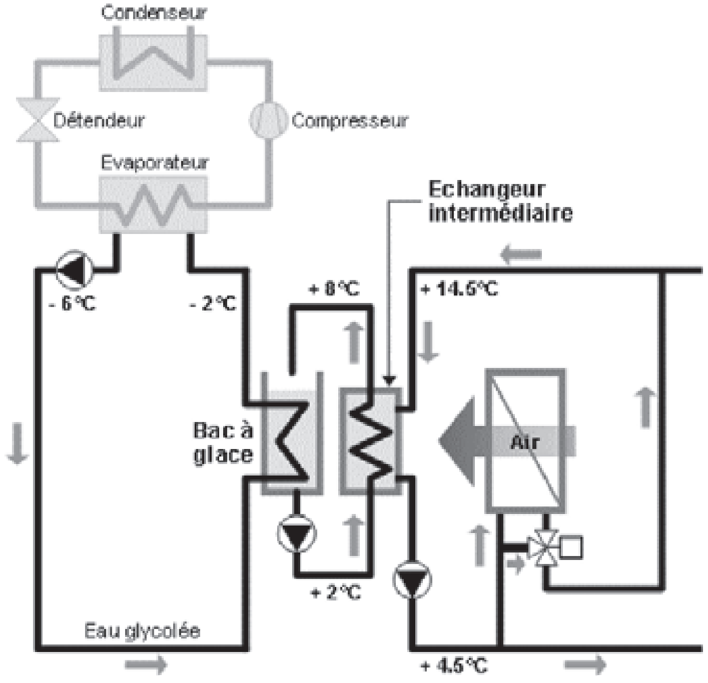
Source : IEPF, 2006.

19. IEPF, 2006, p. 107.

5.3.2 Stockage de froid

Applicable aux centrales fonctionnant à l'eau glacée, ce système permet de stocker le froid et ainsi d'atténuer les pointes de fonctionnement, de réduire la puissance de l'installation nécessaire et de réaliser des économies sur les tarifications. Les plus courants restent les systèmes à stockage de glace, tel qu'illustré ci-dessous.

Illustration 5.38 : Stockage de glace



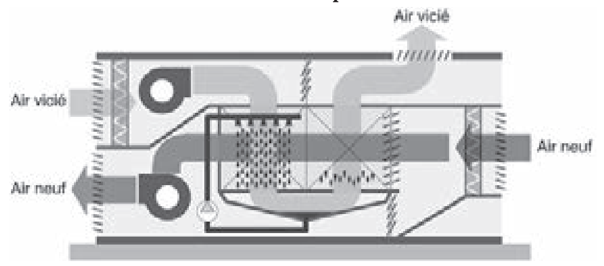
Source : Université Catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

5.3.3 Refroidissement adiabatique

Nous avons vu précédemment que l'air pouvait être refroidi par évaporation mais que ce processus était limité par une humidité déjà élevée en climat tropical. Une solution de contournement consiste à humidifier l'air repris par le climatiseur et à transférer le froid à l'air entrant via un échangeur. La puissance frigorifique installée peut ainsi être réduite à hauteur de 50 %[20].

20. IEPF, 2006, p. 111.

Illustration 5.39 : Processus de refroidissement adiabatique

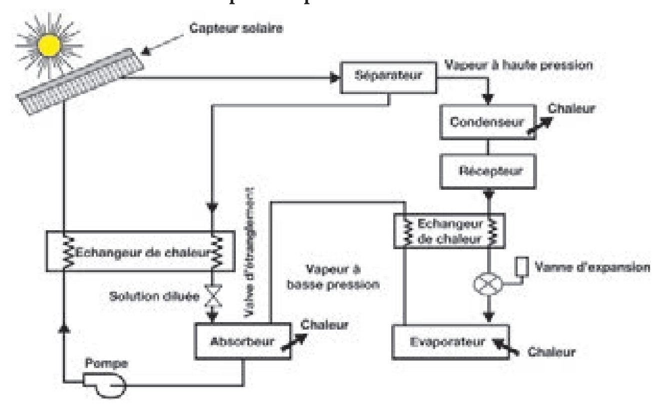


Source : IEPF, 2006.

5.3.4 Climatisation solaire par absorption

Ces systèmes utilisent l'énergie thermique du soleil dans un dispositif de circuit fermé. Un réfrigérant à l'état gazeux est absorbé par un solvant dans l'absorbeur puis est porté à un niveau de pression plus élevé dans le bouilleur solaire par une pompe. L'apport de chaleur provenant des capteurs solaires permet alors de faire circuler le réfrigérant jusqu'au condenseur afin qu'il soit détendu puis remis à l'état gazeux dans l'évaporateur[21].

Illustration 5.40 : Climatisation solaire par absorption



Source : ENERGIES 2050, d'après Ahmadul Ameen, 2005, p. 5.

De nombreux bénéfices peuvent être retirés d'une sélection judicieuse du système d'air conditionné, et ce, tout au long de la durée de vie du bâtiment : réduction des coûts de construction, d'entretien et de la consommation énergétique, et confort accru. La priorité restera, cependant, de modérer les besoins en amont grâce à une bonne conception du bâtiment. Les tableaux suivants, issus du guide 2006 sur l'efficacité énergétique de la climatisation en milieu tropical, fournissent un aperçu des systèmes disponibles et de leur utilité.

21. www.lepanneausolaire.net (consultation novembre 2014).

Tableau 5.17 : Aperçu des critères de sélection d'un système de climatisation

Destination	Unité autonome à eau		Split system	Split	Cassette	Climatiseurs gainés	Autonomes	Ventilo convect.	Ventilo convect. gainés
	Non gainée	Gainable	Gainé	1 unité interne	2/3 unités internes	Armoire	Faux plafond		
Locaux indépendants	oui	non	non	oui (1)	oui	oui	oui	non	non
Plusieurs locaux avec régulation individuelle de température	oui	non	non	non	oui (1)	non	non	oui	non
Plusieurs locaux sans régulation individuelle de température	non	oui	oui	non	non	oui	oui	non	oui
Locaux spacieux faiblement fréquentés	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Locaux fortement fréquentés	non	non	non	non	non	non	non	non	oui
Locaux où sont exposées des substances irritantes	non	non	non	non	non	non	non	non	oui
Applications	**Unité autonome à eau**		**Split system**	**Split**	**Cassette**	**Climatiseurs gainés**	**Autonomes**	**Ventilo convect.**	**Ventilo convect. gainés**
Résidentielles	oui	oui	oui	non	non	non	oui	non	non
Hôtels et résidences	oui	oui	non	oui (1)	oui (1)	non	non	oui	oui (2)
Bureaux	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Études professionnelles	oui	oui	oui	non	non	non	oui	non	non
Supermarchés/centres commerciaux	non	non	non	oui	oui	oui	non	non	oui
Boutiques/magasins	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Petits restaurants	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Moyens/grands restaurants	non	non	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Discothèques/boîtes de nuit	non	non	non	non	non	non	non	non	oui
Banques/bureaux de poste	non	non	non	oui	oui	oui	oui	non	oui

(1) : vastes pièces seulement. (2) : salles publiques seulement : halls, restaurants.
Source : IEPF, 2006, pp. 113-116.

Références

Ahmadul Ameen, 2005. *The challenges of air conditioning in tropical and humid tropical climates*, Université Sains Malaysia, Pulau Pinang, Malaisie, disponible via http://www.seedengr.com/documents/The%20Challenges%20of%20Air-Conditioning%20in%20tropical%20and%20Humid%20Tropical%20Climates.pdf.

Dahl, R., 2013. *Cooling Concepts : Alternatives to Air Conditioning for a Warm World*. Environmental Health Perspectives, vol. 121 (1), pp. A19-A25**.**

IEPF (Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie), 2006. *Efficacité Énergétique de la climatisation en région tropicale, tome 1 : conception des nouveaux bâtiments*, IEPF, Québec, Canada, accès via http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME1.PDF.

Kemajou A., Mba L. et Pako Mbou G., 2007. *Energy efficiency in air-conditioned buildings of the tropical humid climate*, Laboratory of Refrigeration and Air Conditioning, Université de Douala, Cameroun, disponible via http://www.arpapress.com/Volumes/Vol11Issue2/IJRRAS_11_2_07.pdf.

Kjellstrom T. et Lundgren K., 2013. *Sustainability Challenges from Climate Change and Air-conditioning in urban areas*, sustainable cities special issue of sustainability, MDPI, Bâle, Suisse, disponible via http://www.mdpi.com/2071-1050/5/7/3116.

Koizumi S., 2007. *Energy efficiency of air conditioners in developing countries and the role of CDM*, IEA information paper, Paris, France, disponible via http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy_efficiency_air_conditioners-1.pdf.

Solener, 2014. *L'architecture bioclimatique en climat tropical humide : Conception thermique,* Module pour l'Initiative pour la Promotion des Villes Durables en Afrique, octobre 2014, Lomé, Togo.

Solener, ADEME, 2014. *Guide climatisation tertiaire en Guyane,* ADEME Guyane (version d'octobre 2013).

Sites internet *(dernière consultation en novembre 2014)* et sources additionnelles des illustrations

Building Science : www.buildingscience.com

Climatisation.ch : http://www.climatisation.ch

Elemental building : http://elementalbuilding.com/2010/07/30/radiant-cooling-in-the-ceiling/

Portail expert de la consommation énergétique : http://conseils.xpair.com

Rehau : http://www.climamaison.com/conseil-expert/plancher-rafraichissant.htm

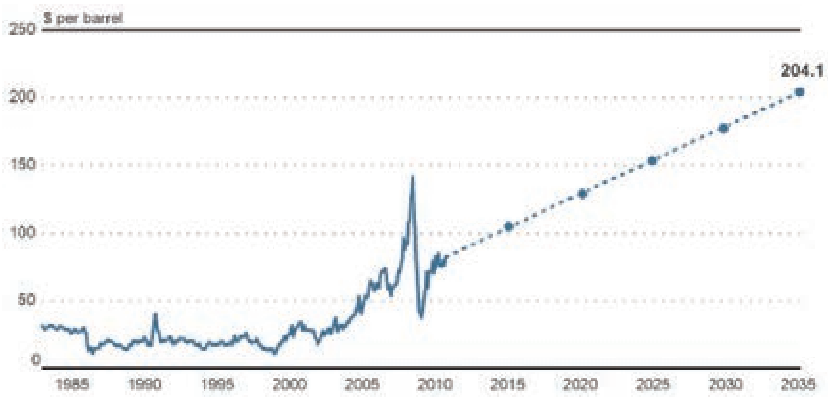
Université Catholique de Louvain (Cellule de Recherche en Architecture et Climat), *Site Energie +* : http://www.energieplus-lesite.be

Windfinder : www.windfinder.com

Chapitre 6
Énergies renouvelables

Intégrer l'utilisation des énergies renouvelables dès la conception du bâtiment peut permettre d'accroître leur efficacité, de réduire en amont et de manière durable la facture énergétique, d'économiser sur les coûts d'installation et de limiter l'impact environnemental du bâtiment. Dans le cadre d'un climat tropical, on s'intéressera notamment aux technologies permettant l'exploitation de l'énergie solaire pour la production d'eau chaude sanitaire et d'électricité. La hausse continue du prix de l'énergie, et particulièrement celle des produits pétroliers, rend par ailleurs l'adoption de ces technologies de plus en plus viables économiquement.

Illustration 6.1 : Projection des prix des produits pétroliers



Source : Reuters, IEA (consultation des sites novembre 2014).

6.1 Production d'eau chaude par panneau solaire

Deux types de systèmes permettent de produire de l'eau chaude en utilisant l'énergie solaire : les capteurs plan vitré et les capteurs à tubes sous vide. Ces systèmes sont reliés à un chauffe-eau solaire qui fonctionne à l'image d'une installation traditionnelle.

Illustration 6.2 : Réseau chauffe-eau solaire

Source : www.les-energies-renouvelables.eu (consultation novembre 2014).

6.1.1 Capteurs plan vitré

Un panneau à capteurs plan vitré est composé :

- d'un corps noir absorbant le rayonnement solaire (absorbeur). Celui-ci est en contact avec des tubes métalliques dans lesquels circule un fluide caloporteur chargé de transporter l'énergie ;
- d'un isolant thermique qui limite les perditions de chaleur ;
- d'une surface vitrée permettant d'accroître l'efficacité du système par effet de serre.

Tous ces éléments peuvent être intégrés à la toiture ou enfermés dans un caisson, avec des joints étanches pour protéger le système des pluies.


Illustration 6.3 : Capteur plan vitré



Source : www.lepanneausolaire.net (consultation novembre 2014).

Illustration 6.4 : Fonctionnement du capteur plan

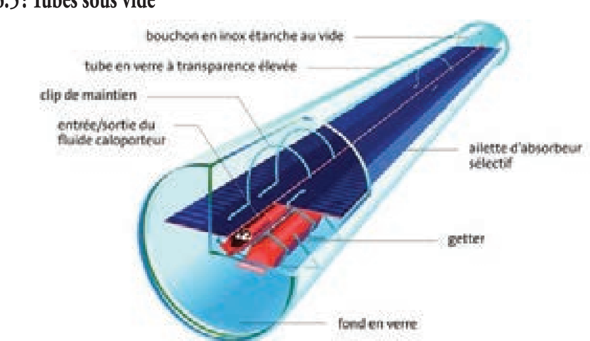
Source : www.lepanneausolaire.net (consultation novembre 2014).

En absorbant une partie de l'irradiation solaire, le capteur s'échauffe et transmet cette chaleur au fluide caloporteur qui circule dans les tubes. L'absorbeur émet également un rayonnement d'infrarouges qui est en partie absorbé par le vitrage et en partie réfléchi par le film placé sur l'isolant, limitant ainsi les déperditions thermiques en créant un effet de serre.[1]

6.1.2 Le capteur à tubes sous vide

Le fonctionnement d'un capteur à tubes sous vide est similaire à celui du capteur plan, mais avec une efficacité accrue : l'air est évacué des tubes qui sont fermés hermétiquement, ce qui limite les déperditions thermiques. Ces technologies, moins abordables financièrement, sont généralement réservées aux utilisations nécessitant une eau très chaude (80°C) ou pour la climatisation par absorption présentée précédemment.

Illustration 6.5 : Tubes sous vide



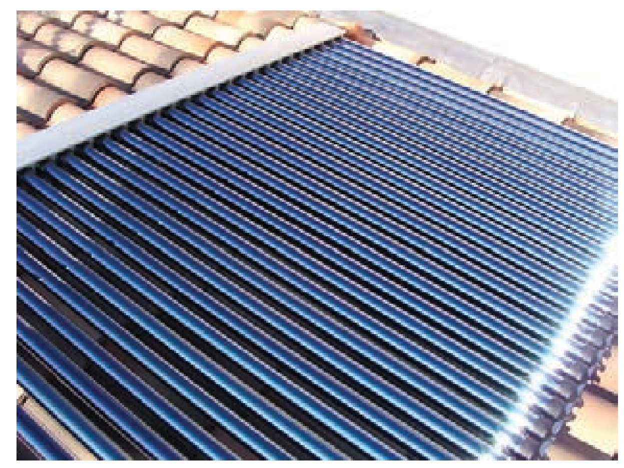
Source : www.solairethermique.guidenr.fr (consultation novembre 2014).

1. Institut National de l'Énergie Solaire, 2007.

Tout comme pour les capteurs plans, il est très important de bien orienter les tubes afin de maximiser l'exposition au soleil.



Illustration 6.6 : Installation de tubes sous vide sur toit



Source : Helio France (consultation du site novembre 2014).

6.1.3 Puissance utile et rendement des capteurs

La puissance utile (Eu) pouvant être retirée des capteurs dépendra notamment[2] :

- De la puissance solaire incidente sur le plan du capteur, en W/m² (E) ;
- De la température moyenne du capteur (T_m) et de celle à l'extérieur (T_{ext}), qui conditionnent les pertes thermiques, en degrés Celsius ;
- Du facteur optique du capteur β (rapport entre l'ensoleillement absorbé et l'ensoleillement incident sur le vitrage) qui dépend du facteur de transmission du vitrage τ et du coefficient d'absorption α de l'absorbeur.

Le rendement utile est égal à la puissance incidente traversant le vitrage et absorbée par l'absorbeur à laquelle est soustraite la déperdition thermique. Ainsi :

$$(1)\ Eu = \beta P - k(Tm - Text)$$

Où,

- k = coefficient de déperditions thermiques (W/m²K – Watt par m² par degrés de différence de températures entre le fluide caloporteur et l'air extérieur). Ce coefficient dépend notamment du niveau d'isolation et de la qualité de l'absorbeur du capteur, ainsi que de la nature de l'absorbeur.

2. Institut National de l'Énergie Solaire, 2007.

Plus précisément, le rendement du capteur η (relation entre puissance utile EU et puissance incidente sur le plan du capteur P) peut lui être calculé, selon le standard européen EN-12975, par :

$$(2)\ \eta = \beta - a_1 \frac{T_M - T_{EXT}}{P} - a_2 \frac{(T_M - T_{EXT})^2}{P}$$

Où,

- a_1 = coefficient de déperditions thermiques par conduction du capteur ;
- a_2 = coefficient de déperditions thermiques du capteur par convection[3] ; et
- P = l'irradiation solaire reçue par le capteur en W/m².

Les coefficients de déperditions thermiques a_1 et a_2 dépendent du niveau d'isolation du capteur et de la nature de l'absorbeur. Le tableau suivant donne une indication des valeurs types a1 et a2 en fonction du type de capteur :

Tableau 6.1 : Valeurs types de déperditions thermiques a_1 et a_2

Type de capteur	Valeur coefficient a_1	Valeur coefficient a_2
Capteur sans vitre	Entre 20 et 25	Très important
Capteur vitré simple	Entre 4 et 6	Entre 0.05 et 0.01
Capteur vitré sélectif	Entre 3 et 5	Entre 0.005 et 0.015
Capteur sous vide	Entre 1 et 3	Entre 0.004 et 0.01

Source : www.solairethermique.guidenr.fr (consultation novembre 2014).

L'irradiation reçue par le capteur P dépendra lui de l'irradiation solaire et de l'angle d'incidence du soleil sur le capteur (ci-dessous 0° correspond à des panneaux orientés perpendiculairement par rapport au soleil).

Tableau 6.2 : Évolution de l'irradiation en fonction du type de l'angle d'incidence du soleil sur la surface du capteur

Angle d'incidence	Pourcentage du rayonnement solaire sur l'absorbeur
30°	86 % (par exemple 860W/m² pour une irradiation solaire de 1000W/m²)
45°	70 %
75°	25,8 %
90°	0

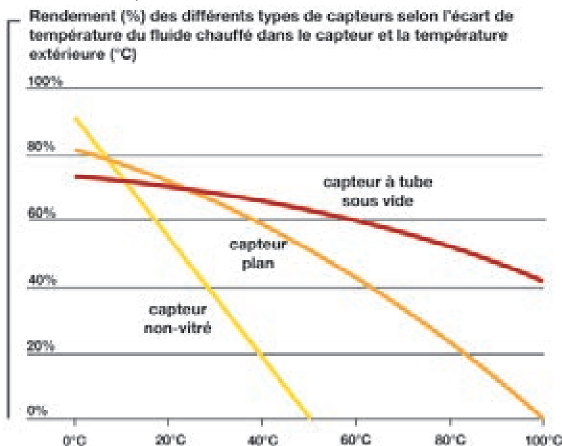
Source : http://www.bysun.fr (consultation novembre 2014).

Le graphique suivant montre comment l'écart entre les températures de l'air extérieur et celles du fluide caloporteur influe sur la performance des différents systèmes.

3. Échange de chaleur entre la surface du capteur et l'air mobile lorsque celui-ci entre à son contact.

Les capteurs non vitrés sont essentiellement utilisés pour la production de chauffage de l'air et ne sont donc pas ou très peu utilisés en climat tropical.

Illustration 6.7 : Rendement des systèmes en fonction de l'écart T_m-T_{ext}

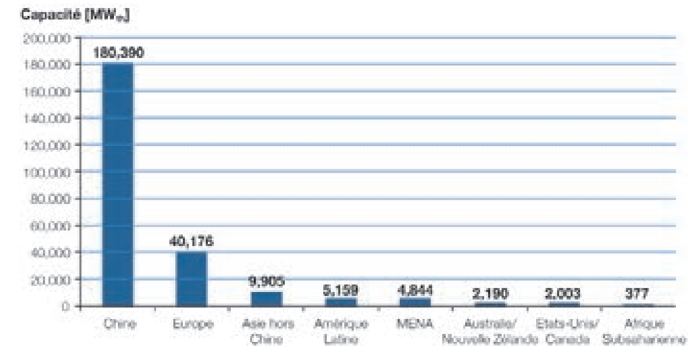


Source : http://www.chauffagesolaire.net (consultation novembre 2014), illustration redessinée par ENERGIES 2050.

Nous pouvons voir que la performance d'un capteur à tube sous vide est accrue comparativement aux capteurs plans à mesure que les températures s'élèvent. Néanmoins, un capteur plan suffira pour une utilisation basique (eau chaude à 50 ou 60°C) et présentera par ailleurs des coûts d'installation moins élevés.

Le potentiel de développement de ces technologies dans les pays tropicaux, qui disposent de conditions a priori favorables (fort ensoleillement, températures extérieures élevées), est d'autant plus conséquent qu'elles n'y sont pour le moment que peu répandues.

Illustration 6.8 : Capacité installée de production d'eau chaude solaire par régions



Source : ENERGIES 2050, d'après Mauthner F. et Weiss W., 2014, p. 16.

Plus de détails sur l'orientation et l'installation des panneaux solaires seront fournis dans la partie qui suit.

6.2 Le photovoltaïque

6.2.1 Principes et composants

Le principe repose ici sur la transformation en électricité d'une partie du rayonnement solaire au travers d'une cellule photovoltaïque (PV). Cette cellule est séparée entre une zone présentant un excès d'électrons (dite zone dopée n) et une autre en déficit d'électrons (zone dopée p). Elle est fabriquée avec des matériaux semi-conducteurs qui, sous l'action de la lumière et l'apport de photons, émettent des électrons. Ceux-ci sont éjectés dans un circuit fermé et circulent entre les deux zones, produisant de l'électricité. Il est important de souligner que seul le rayonnement solaire est utilisé : les panneaux photovoltaïques auront donc une productivité limitée si placés dans l'ombre ou sous un ciel couvert.

Illustration 6.9 : Représentation schématique du fonctionnement d'une cellule PV

Source : www.tpepanneauxsolaires.fr (consultation novembre 2014).

Le système dans son ensemble est composé des modules photovoltaïques ainsi que de composants regroupés sous le terme BOS (Balance Of System). Ils incluent notamment les composants de distribution du courant (câbles, connectiques, protection), un onduleur, le système de supervision et le système de production.

Illustration 6.10 : Système photovoltaïque intégré

Source : www.norellagg.com (consultation novembre 2014).

6.2.2 Efficacité du système

La production d'électricité par une installation peut être estimée en utilisant l'équation suivante[4] :

$$(3)\ E_{elec} = Hi \times S \times \eta$$

Où

- E_{elec} = l'électricité produite par le panneau (kWh par an) ;
- Hi = irradiation globale reçue pendant un an par les modules sur une surface de 1m² (kWh/m².an) ;
- S = surface du champ des modules photovoltaïques ;
- η = rendement global du système (généralement autour de 0.8).

L'électricité produite est donc directement proportionnelle aux radiations solaires que les cellules reçoivent. Il est donc crucial de bien choisir l'inclinaison des panneaux et de les intégrer dans les premiers stages de la conception du bâtiment.

L'angle d'inclinaison idéal est généralement déterminé par la latitude du site : en régions tropicales, une inclinaison de 0° à 15° est conseillée. La trajectoire du soleil se fait en effet sur un axe Est – Ouest avec un passage assez haut dans le ciel quelle que soit la période de l'année. L'installation aux murs ou en matériel d'ombrage pour les fenêtres, notamment celles exposées Nord et Sud, est conseillée parfois en climat tempéré mais n'est ici pas adaptée : les panneaux resteraient à l'ombre une majeure partie du temps.

6.2.3 Conseils pour l'intégration dans un bâtiment

L'architecture et l'orientation du bâtiment doivent donc être évaluées en conséquence. Il sera ainsi important de :

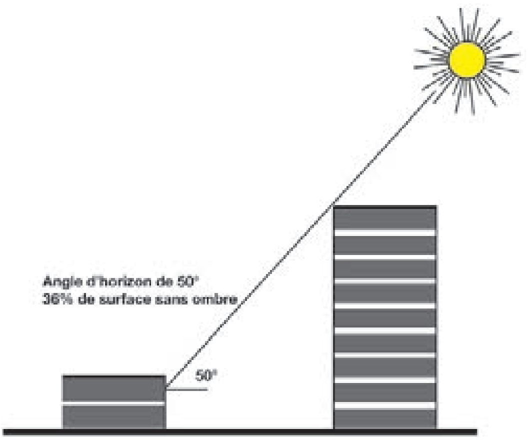
- Considérer l'ensemble des obstructions aux rayonnements directs du soleil (topographie, infrastructures, végétation) afin de pouvoir minimiser les zones d'ombres sur les panneaux solaires. Dans l'illustration ci-après, la production serait ainsi réduite de 64 % comparée à une installation similaire sans ombrages ;
- Adopter une architecture du bâtiment et des structures minimisant les zones d'ombres sur les panneaux ;
- S'assurer de la bonne ventilation du système pour éviter les apports thermiques potentiels vers l'intérieur du bâtiment (ajout de charges frigorifiques) ;
- Favoriser une pente minimale des toits (à balancer avec évacuation des eaux néanmoins) afin d'optimiser l'inclinaison des panneaux en milieu tropical ;
- S'assurer lors de la conception des panneaux de la bonne ventilation du matériel et de la protection contre les poussières et pollutions ;

4. www.photovoltaique.info (consultation novembre 2014).

- Une bonne isolation permettra de réduire les transferts thermiques entre le toit et l'intérieur du bâtiment, et donc les apports de chaleur non désirés;
- Les panneaux solaires peuvent être directement intégrés aux toits et amener des économies sur les matériaux et les coûts de construction. Ils peuvent également être installés directement sur sols, à condition de respecter l'inclinaison et de vérifier les blocages aux rayonnements solaires potentiels.

Dans les deux cas (production d'eau chaude et électricité) il est enfin très important que les installations soient facilement accessibles, notamment pour faciliter leur entretien (voir les illustrations suivantes).

Illustration 6.11 : Réduction de la production de PV suivant les obstructions



Source : ENERGIES 2050, d'après Max Fordham & Partners, 1999.

Illustration 6.12 : Exemple d'ombrage provoqué par un élément du bâtiment



Source : http://forum-photovoltaique.fr/viewtopic.php?f=26&t=7350 (consultation novembre 2014).

Illustration 6.13 : Panneaux photovoltaïques à plat avec couleur des toits réfléchissante pour limiter les apports de chaleur



Source : EDF EnR via (consultation du site novembre 2014).

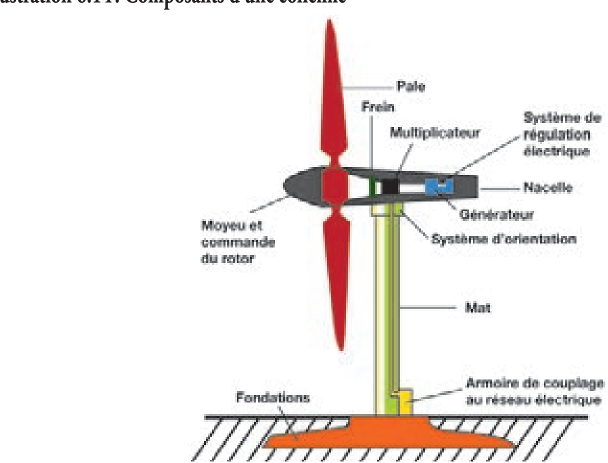
6.3 Autres énergies renouvelables : éolien et biomasse

6.3.1 Énergie éolienne

6.3.1.1 Principes de fonctionnement

Dans le cadre du bâtiment, une option encore peu exploitée mais en développement est l'utilisation d'éoliennes de petite taille. Une éolienne est une structure qui permet la production d'électricité en utilisant la force cinétique du vent.

Illustration 6.14 : Composants d'une éolienne



Source : www.les-energies-renouvelables.eu (consultation novembre 2014).

Le vent amène un mouvement circulaire de la pale dont la fréquence est accrue par le multiplicateur. L'énergie générée passe ensuite par le générateur qui produit de l'électricité, dont le voltage est modulé par un transformateur avant d'arriver dans le réseau électrique (individuel ou global) via l'armoire de couplage.

Des applications individuelles existent avec des tailles de mât ne dépassant pas 12m. La puissance des éoliennes pour particulier (3 à 12m) varient généralement entre 100W et 20Kw selon les modèles. Il s'agit souvent d'éoliennes à trois pales inclinées horizontalement, avec un niveau sonore ne dépassant pas 45dB. Ces structures peuvent être utilisées pour des applications en bâtiments domestiques ou commerciaux et l'énergie produite peut être stockée dans des batteries.

La production électrique d'une éolienne peut être définie par l'équation suivante[5] :

$$(4)\ \ P_e = \frac{C_{tot} \rho\ A\ u^3}{2}$$

Où

- P_e = électricité produite par l'éolienne (W) ;
- C_{tot} est le coefficient d'efficacité de la structure (sans dimension) ;
- A = taille des pâles (m^2) ;
- p= densité de l'air (kg/m^3) ; et
- u= vitesse du vent (m/s).

6.3.1.2 Conseils pour intégration au bâtiment

L'efficacité d'une éolienne dépendra de la force et de la direction des vents : une analyse consciencieuse doit donc être faite dans ce domaine et un placement en terrain dégagé (généralement le toit) est conseillé. Le bâtiment peut provoquer cependant des turbulences négatives pour les performances de l'installation et il est conseillé qu'une éolienne sur toit ait une taille minimum équivalente à 40 % ou 50 % de celle du bâtiment, avec une inclinaison des pales plutôt horizontale. Les vibrations peuvent également causer des fatigues de la structure qu'il faudra prendre en considération.

Illustration 6.15 : Éolienne de toit



Source : www.greenvivo.com (consultation novembre 2014).

Le développement de ce type de technologie présente néanmoins certaines limites dues à :

- la densité urbaine pouvant créer des turbulences importantes ;

5. www.mathworks.fr (consultation novembre 2014).

- les contraintes d'usages élevées et les possibles contraintes réglementaires ;
- les coûts d'investissements :
- l'impact sur l'esthétisme du bâtiment.

6.3.2 Biomasse

La biomasse inclut toutes les matières organiques telles que la végétation (plantes, arbres, herbes), les résidus agricoles ou les déchets organiques. Les technologies pour la production d'énergie à partir de biomasse sont variées, incluant notamment :

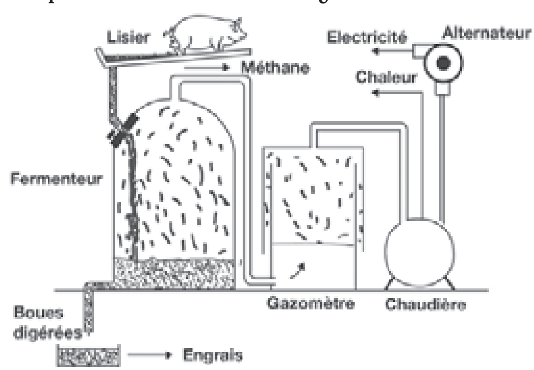
- Les traitements thermochimiques qui permettent de convertir la biomasse en chaleur et en énergie, notamment via la combustion, la pyrolyse ou encore la gazéification ;
- Les applications en cuisine (poêles, chauffe-eau, gazéification).

Tableau 6.3 : Principales utilisations de la biomasse

Chaleur	Énergie	Énergie et chaleur
Chauffe-eau, poêles et chaudières	Combustion amenant génération d'électricité par vapeur	Production d'électricité par vapeur + récupération de chaleur

La biomasse est une source importante de production énergétique dans les pays en développement et en milieu rural (cuisine notamment). Intégrer son utilisation dans la structure du bâtiment (par exemple en l'équipant de poêles et de chaudières spécialisés) peut être un moyen efficace non seulement de réduire la facture énergétique mais également d'intégrer ces pratiques tout en limitant leurs effets négatifs (par exemple sur la santé). Un projet de plusieurs bâtiments pourra également s'équiper d'un biodigesteur, permettant de transformer la biomasse en gaz (méthane) ou en électricité.

Illustration 6.16 : Principes de fonctionnement d'un biodigesteur



Source : La boîte à cerveau (consultation du site novembre 2014), illustration redessinée par ENERGIES 2050.

La fermentation de la biomasse en milieu dépourvu d'oxygène (méthanisation) crée ici du méthane qui est utilisé pour alimenter une chaudière permettant de produire de l'électricité et de la chaleur.

Références

Institut National de l'Énergie Solaire, 2007. *Formation continue, Présentation des Technologies Solaires*, disponible via http://www.grenoble.archi.fr/chaleursurbaines/DDocumentINTRAEcoleArchi.pdf.

Mauthner F. et Weiss W., 2014. *Solar Heat Worldwide*, Market and Contributions to the Energy Supply 2012, AEE-IEA, Gleisdorf, Austria, disponible via http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2014.pdf.

Max Fordham & Partners, 1999. *Photovoltaic in Buildings : A Design Guide*, DTI, Gloucester, Royaume-Uni.

Sites internet *(dernière consultation en janvier 2015)* et sources additionnelles des illustrations

Bysun : http://www.bysun.fr/Etude%20de%20rendemment%20des%20capteurs.pdf

EDF EnR via : http://dualsun.fr/2013/02/installations-compatibles/

Forum PV : http://forum-photovoltaique.fr/viewtopic.php?f=26&t=7350

Helio France via Wikimedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Capteur_a_tubes_sous_vide_001.JPG

Laboîteàcerveau : www.greenetvert.fr/2011/09/26/la-bouse-et-le-crottin-les-combustibles-du-futur/33837

Le Panneau Solaire : http://www.lepanneausolaire.net

Les Énergies Renouvelables : http://www.les-energies-renouvelables.eu

Mathworks – éoliennes : http://www.mathworks.fr/products/symbolic/code-examples.html?file=/products/demos/symbolictlbx/Wind_turbine/Wind_turbine_power.html

Norellagg : http://www.norellagg.com/pvisole.php

Photovoltaïque : http://www.photovoltaique.info/Rendement-d-un-systeme.html

Reuters, **source IEA** : http://in.reuters.com/article/2010/11/09/idINIndia-52784720101109

Institut National de l'Énergie Solaire - Bilan Thermique d'un capteur : http://ines.solaire.free.fr/solth/page40.html

Solaire Thermique : http://www.solairethermique.guidenr.fr

TPE Panneaux solaires : http://www.tpepanneauxsolaires.fr

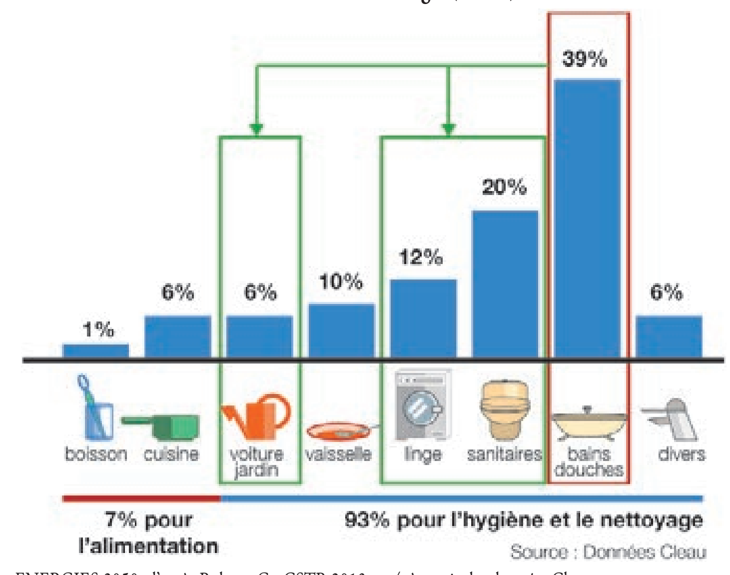
Chapitre 7
Gestion de l'eau

L'eau est devenue une ressource cruciale dont il faut tenir compte dans la conception des bâtiments. Il existe plusieurs méthodes qui peuvent être appliquées pour réduire la consommation, notamment :

7.1 Réserver la consommation d'eau potable uniquement à l'alimentation

Utiliser une eau traitée ou de pluie pour l'hygiène, le nettoyage ou l'arrosage des espaces verts peut amener des gains potentiels pouvant aller jusqu'à plus de 90 % de l'eau potable habituellement consommée, en fonction du pays et du mode de consommation.

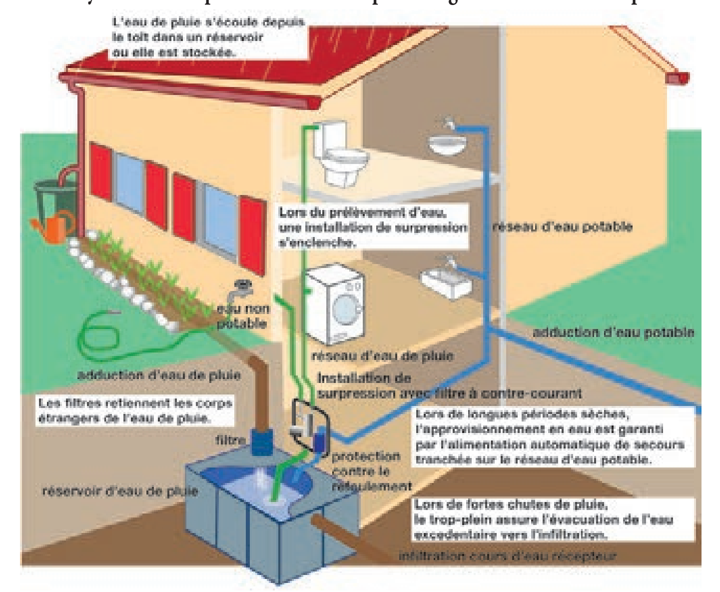
Illustration 7.1 : Consommation d'eau en fonction des usages (France)



Source : ENERGIES 2050, d'après Bulteau G., CSTB 2013, p. 4, à partir des données Cleau.

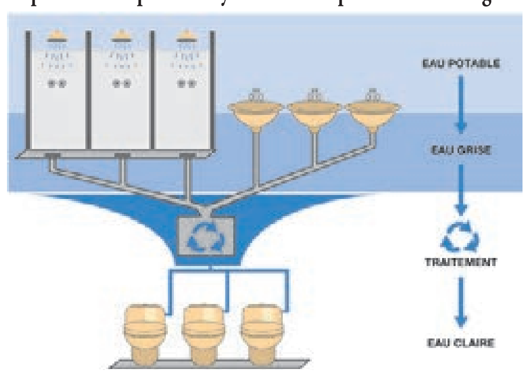
Équiper le bâtiment de deux systèmes de plomberie différenciés (eau potable, eau pour utilisation hygiénique) peut permettre de supporter cet objectif. L'eau destinée pour l'hygiène et le nettoyage peut alors être fournie, par exemple, par la récupération des eaux de pluie ou par le traitement et le recyclage des eaux grises[1] via un système intégré au bâtiment.

Illustration 7.2 : Système de récupération des eaux de pluie intégré en habitat domestique



Source : ENERGIES 2050, d'après http://recuperation-eau-de-pluie.durable.com/ (consultation décembre 2015).

Illustration 7.3 : Principes schématiques d'un système de récupération des eaux grises



Source : ENERGIES 2050, d'après www.aquae.fr (consultation novembre 2014).

1. Eaux savonneuses des bains, douches et lavabos, à différencier des eaux noires des toilettes qui doivent être évacuées.

7.2 Installer dès la construction des technologies permettant une gestion efficace des ressources en eau

Les technologies permettant une gestion efficace des ressources en eau comprennent notamment :

- Toilettes à faible consommation d'eau (3 litres d'eau par chasse pour les plus efficientes, contre 12 en moyenne), toilettes sèches ou encore chasses d'eau à double vitesse (2,2 à 4,4 litres économisés par chasse). Des urinoirs sans eau peuvent également être installés dans les bâtiments non domestiques ;
- Réducteurs de pression sur les robinets et les douches, mousseurs (air injecté pour maintenir le débit avec moins d'eau), valves autocontrôlées ou encore pommeaux de douche efficients ;
- Appareils électriques à faible consommation d'eau et à hautes performances énergétiques (informations généralement fournies dans le catalogue constructeur) ;
- Plomberie résistante et entretiens réguliers pour éviter les fuites ;
- Choix d'une végétation locale et peu consommatrice d'eau.

7.3 Limiter le débit d'évacuation des pluies tropicales

Construire un bâtiment mène généralement à une évacuation des eaux de pluie plus rapide car l'étanchéité des sols est accrue. Cela a des conséquences négatives notamment en termes de processus de filtration (sédiments et nutriments) des eaux et de rechargement des nappes phréatiques, et peut également amener des risques accrus d'inondation. Différentes méthodes existent pour ralentir ces flux[2] :

- Limiter les perturbations à la topographie et végétation locales pouvant jouer un rôle dans l'absorption des eaux de pluie. Cela peut également permettre d'éviter des problèmes d'inondations et de glissements de terrain ;
- Renforcer la perméabilité des sols (pavés et surfaces poreuses), redirection de l'évacuation depuis les surfaces imperméables vers les surfaces perméables si possible ;
- Utiliser les toits verts pour améliorer l'absorption (illustration 7.4) ;
- Utiliser des tranchées d'infiltration, des noues ou des jardins d'eau (jardins construits avec des plantes aquatiques et organisés autour de l'eau, en utilisant notamment des systèmes de bassin ou de noues) (illustrations 7.5, 7.6 et 7.7).

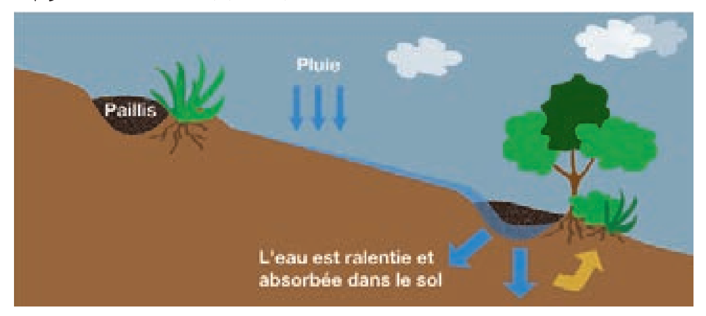
Illustration 7.4 : Toit vert, Université technologique de Nanyang (Singapour)



Source : Conseil Régional du Cairns (Cairns Regional Council), 2011, p. 22.

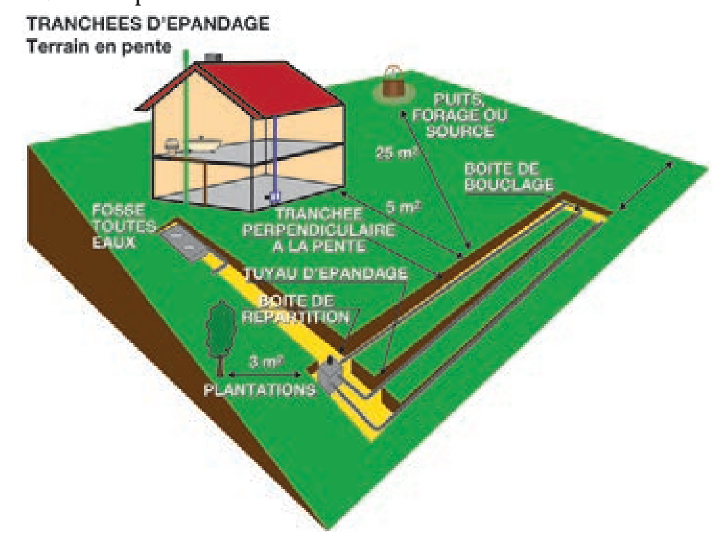
2. Conseil Régional du Cairns (Cairns Regional Council), 2011, pp. 22-24.

Illustration 7.5 : Fonctionnement d'une noue



Source : ENERGIES 2050, d'après www.wrightings.com.au (consultation novembre 2014).

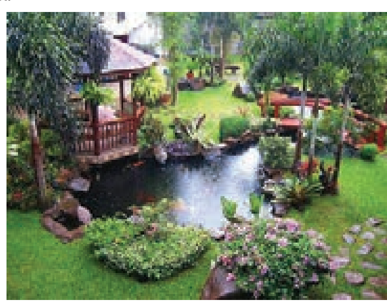
Illustration 7.6 : Principes d'une tranchée d'infiltration



Source : ENERGIES 2050, d'après www.spanc-cinor.re (consultation novembre 2014).



Illustration 7.7 : Jardin d'eau



Source : Fundación para la calidad educativa, http://www.fucaed.com/

Encadré 7.1 : Études de cas de bâtiments verts non domestiques

Tableau 7.1 : Étude comparative de deux bâtiments verts (bureaux)

Bâtiments	CII Sohrabji Godrej Green Business Centre (Hyperabad, Inde)	Open financial centre (Singapour)
Type	Centre de commerce avec bureaux, hall pour séminaire et Centre de Technologies Vertes intégré	Centre financier avec grandes baies vitrées, 43 étages de bureaux, 5 étages de parking, 1 étage de commerces.
Photo		
Principales mesures	• Gestion technique du bâtiment; • Utilisation de béton cellulaire pour réduire les apports thermiques de 15-20 %; • Double vitrage avec remplissage argon; • Eau utilisée traitée sur place et utilisée pour les espaces verts, avec système de récupération des eaux de pluie; • Impact écologique minimal sur le site; • 80 % des matériaux de construction proviennent de moins de 800km du site et sont fabriqués pour la plupart à partir de matériaux recyclés; • 20 % des besoins du bâtiment fournis par des panneaux photovoltaïques (capacité installée 23.5 kW); • Taux d'ouverture de la façade Nord maximisé pour l'entrée de lumière sans apport excessif de chaleur; • Jardin recouvrant 60 % du toit du bâtiment; • Contrôle automatique des lumières et utilisation d'ampoules à haute efficacité énergétique.	• Triple vitrage avec revêtement à faible émissivité pour maximiser l'entrée de lumière tout en limitant les apports de chaleur; • Ampoules à haute efficacité énergétique; • 400 m^2 de panneaux photovoltaïques recevant 75kWp d'énergie solaire à une hauteur de 250m; • Récupération de l'énergie générée par les ascenseurs durant le freinage; • Programmateur automatique pour air conditionné et éclairage, avec arrêts automatiques; • Murs et toits végétaux pour meilleure protection contre les radiations; • Système de récupération de chaleur pour eau chaude; • Recyclage des matériaux de construction pour nouveaux bâtiments; • Peinture isolante des parois extérieures; • Mesures de conservation de l'eau.

Source : Asia Business Council (consultation du site novembre 2014).

Résultats :

Bâtiments	CII Sohrabji Godrej Green Business Centre (Hyperabad, Inde)	Open financial centre (Singapour)
Surface totale du bâtiment	1858 m²	6109 m²
Économie d'énergie	55 % basée sur cas de base ASHRAE 90.1, ou 120.000 kWh/an	35 %, ou 9.08 millions kWh/an
Émissions de GES	100 tonnes par an (CO_2e)	4500 tonnes par an (CO_2e)
Économies d'eau	35 % de l'eau potable	37 % (42000 m³ par an)
Conductivité thermique du bâtiment	• Double vitrage : 1,7W/m²K • Murs : 0,57W/m²K • Toits : 0,294 W/m²K	42,76W/m²K pour l'ensemble du bâtiment
COP air conditionné	2,8	2,33
Index d'efficacité énergétique	84 kWh/m².an	174 kWh/m².an

Des exemples de bâtiment durable peuvent également être trouvés dans d'autres secteurs, notamment dans le domaine du tourisme. L'Hôtel Onomo de l'aéroport de Dakar au Sénégal est un exemple de réalisations concrètes effectuées en Afrique. Ses principales caractéristiques sont notamment :

- Utilisation de matériaux locaux, avec notamment un mur d'enceinte en terre crue de 343m*7m, soit près de 930m³ de terre crue compressée. Ce matériau a également été choisi pour ses propriétés thermiques (forte inertie) ;
- Bâtiment organisé autour de patios à végétation luxuriante, vers l'intérieur pour protéger les chambres des nuisances extérieures et favorisant en même temps un environnement agréable et un éclairage naturel ;
- Douches privilégiées aux baignoires dans les chambres et système de récupération des eaux grises ;
- Énergie solaire utilisée pour l'Eau Chaude Sanitaire[a] ;

a. www.afrikadaa.com et http://onomohotel.com (consultation novembre 2014).



Illustration 7.8 : Hôtel Onomo, Aéroport de Dakar au Sénégal



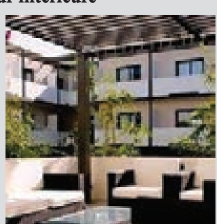
Source : http://onomohotel.com (consultation novembre 2014).

Illustration 7.9 : Hôtel Onomo, entrée



Source : www.afrikadaa.com (consultation novembre 2014).

Illustration 7.10 : Hôtel Onomo, cour intérieure



Source : http://onomohotel.com (consultation novembre 2014).

Références

Bulteau G., CSTB 2013. *Présentation des activités liées à la réutilisation des eaux grises*, CTSB, disponible via http://www.cstb.fr/nantes/fileadmin/user_upload/documents/1303_CSTB_Reutilisation_eaux_grises.pdf.

Cairns Regional City Council, 2011. *Sustainable Tropical Building Design, Guidelines for Commercial Buildings*, Conseil Régional du Cairns, Australie, disponible via http://www.cairns.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/45642/BuildingDesign.pdf.

Sites Internet *(dernière consultation en décembre 2014)* et sources additionnelles des illustrations

Afrikadaa : http://www.afrikadaa.com/2011/03/omono-des-hotels-eco-friendly-en.html

Aquae : http://www.aquae.fr/le-recyclage-des-eau-grises.html

Asia Business Council : http://www.asiabusinesscouncil.org/ResearchBEE-4.html

Fucaed (Fundación para la calidad educativa) : http://www.fucaed.com/

Onomo Hôtel Dakar : http://onomohotel.com/

Récupération durable des eaux de pluie : http://recuperation-eau-de-pluie.durable.com/

Service Public d'Assainissement Non Collectif du territoire de la CINOR : http://www.spanc-cinor.re/spip.php?article68

Wrightings Australia : http://wrightings.com.au/

Conclusion du 1er tome

L'intégration des différents objectifs d'une stratégie passive dans la conception d'un bâtiment est un travail complexe mais qui peut être simplifié si l'on respecte des principes de base organisés autour d'une vision pragmatique du service fonctionnel et esthétique que doit rendre le bâtiment. Celui-ci doit notamment tenir compte des interactions entre les phénomènes de confort thermique, visuel ou sonore, avec pour nœud principal les ouvertures des parois. Ce processus repose en grande partie sur l'analyse approfondie du climat local et sur la définition d'objectifs de confort adaptés.

Par ailleurs, des économies d'énergie substantielles peuvent être réalisées via un dimensionnement approprié des systèmes d'air conditionné correspondant aux charges frigorifiques de chaque local. Le choix du système devra également être décidé en fonction de ces charges, du type de local et des besoins des occupants. L'installation d'outils de contrôle (pour la climatisation mais également l'éclairage) pourra également renforcer l'efficacité énergétique future du bâtiment.

Il est finalement possible de réduire l'impact environnemental en intégrant dès la conception l'utilisation d'énergies renouvelables (en particulier les panneaux solaires) et des systèmes de gestion de l'eau.

L'organisation de ce guide s'inscrit dans une démarche de recherche de sobriété énergétique, d'efficacité et de développement des énergies renouvelables dans le bâtiment.

Le second tome aborde ces mêmes problématiques dans le cadre de la réhabilitation, mais peut également être considéré comme un complément de ce premier tome, notamment sur l'isolation et l'entretien/régulation des systèmes d'air conditionné.

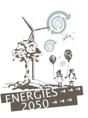
Table des illustrations

Table des tableaux

Table des encadrés







Initiative de la Francophonie pour des villes durables

L'Initiative de la Francophonie pour des Villes durables : une approche systémique pour des stratégies urbaines durables

L'Initiative de la Francophonie pour des Villes Durables (IFVD) soutient la mise en œuvre de stratégies urbaines durables en apportant des réponses concrètes et adaptées aux réalités de chaque ville, quelle que soit sa taille, tout en promouvant une approche holistique qui prenne en compte la complexité urbaine et les interrelations entre les différents systèmes qui les composent. En pratique, il s'agit de construire un puzzle dans lequel chaque pièce, tout en étant indépendante et indispensable, n'a d'utilité que lorsqu'elle se trouve connectée aux autres selon une organisation planifiée, optimisée et cohérente.

Genèse de l'initiative

L'IFVD s'inscrit dans la continuité du programme « Ville, Énergie et Environnement » mis en place par l'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF) entre 2002 et 2011. L'originalité de ce programme tenait en grande partie à sa capacité à prendre en compte la diversité d'une ville tout en ciblant des stratégies d'action sur les deux volets « facilement » identifiables que sont l'énergie et l'environnement.

En 2011, l'Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD), nouvelle appellation de l'IEPF, et l'association ENERGIES 2050 ont décidé de poursuivre l'aventure et ont cofondé l'IFVD pour accompagner les villes et compléter les dynamiques existantes, en s'inscrivant résolument dans une approche systémique.

Une initiative pour mutualiser et démultiplier les moyens d'agir

L'IFVD s'appuie sur les nombreux programmes, projets et initiatives dédiés aux villes et aux différents acteurs impliqués, afin de tirer les enseignements de chacun d'eux et de pouvoir prendre en compte la diversité des contraintes et des réalités, que chacun rencontre dès lors qu'il intervient sur l'environnement construit.

Chaque acteur est confronté aux limites de son territoire de compétence, tout en étant interdépendant des dynamiques que l'ensemble des autres acteurs va mettre en place. Dès lors, l'environnement construit doit s'appréhender comme une partition dans laquelle chaque musicien révèle ses talents de soliste autour d'un objectif commun.

De nombreux partenaires ont déjà rejoint l'IFDD et ENERGIES 2050 dans cette initiative : l'École Africaine des Métiers de l'Architecture et de l'Urbanisme (EAMAU) basée à Lomé ; ONU-HABITAT ; le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) ; le Réseau Habitat et Francophonie ; l'Ordre des Architectes de Côte d'Ivoire ; etc.

D'autres acteurs essentiels ont manifesté un intérêt pour s'associer aux dynamiques portées par l'IFVD : l'Association Internationale des Maires Francophones (AIMF) ; Cités et Gouvernements Locaux Unis (CGLU) ; etc.

Une organisation matricielle pour une initiative au plus proche de la mise en œuvre

L'IFVD a pour ambition de parvenir à des résultats concrets et mesurables. Elle s'articule selon 5 piliers complémentaires :

- fédérer et mutualiser,
- comprendre et partager pour des villes inspirées en devenir,
- mettre en œuvre des programmes d'action à la carte,
- financer la ville inspirée,
- renforcer la capacité d'agir pour des villes participatives et inclusives.

Des premiers résultats concrets

Depuis le lancement de l'IFVD en 2011, plusieurs actions concrètes ont été mises en œuvre sous son couvert, comme en témoignent les exemples ci-dessous :

- Une formation africaine pour les professionnels du secteur de la construction et du bâtiment, de l'aménagement et de la gestion urbaine, en partenariat avec l'EAMAU. La 4e session régionale a débuté en octobre 2015. Plus de 75 professionnels, venant de 14 États, ont déjà été formés pendant 4 mois aux enjeux de la transition énergétique et ont chacun mis en œuvre un projet concret dans leurs pays respectifs.

3 sessions nationales ont déjà été organisées également en partenariat avec l'Ordre des architectes et les acteurs nationaux (Burundi, Togo, Côte d'Ivoire).

- Un module de formation à la construction durable dans les filières urbanisme, gestion urbaine et architecture de l'EAMAU avec déjà plus de 300 étudiants formés.

- Une Université d'été francophone sur les villes et les bâtiments face aux enjeux des changements climatiques : une semaine de formation à Nice (France) au mois de juin 2015 intégrée à un cycle de conférences internationales ; 17 participants (Ministères de l'Habitat et de l'Urbanisme ; Ministères de l'Environnement ; Ordre des Architectes ; etc.).

- Élaboration de manuels de référence en 2015 : ***Guide du bâtiment durable en régions tropicales*** (Publication IFDD) ; État de l'art sur le bâtiment durable et les logements sociaux en Afrique Francophone (Publication PNUE).
- De nombreuses contributions dans des rencontres internationales : Africités (Dakar, 2012) ; Ecocity (Nantes, 2013) ; Forum Urbain Mondial (Medellin, 2014) ; Atelier Régional Efficacité Énergétique dans le Bâtiment en zone tropicale et Ville Durable (Dakar, 2014) ; Forum Global pour l'Habitat Durable/Rio+20+2 (Bogota, 2014) ; Sommet des Solutions (New York, 2014) ; Congrès Mondial d'ICLEI – gouvernements locaux pour le développement durable (Séoul, 2015) ; etc.
- Contributions à plusieurs initiatives internationales : Initiative Bâtiments durables et Climat (PNUE-SBCI) ; Initiative Globale pour des Villes économes en Ressources (GI-REC) ; Programme Bâtiment et Construction durables des Nations Unies (10YFP-SBC) ; etc.
- Un programme de projets pilotes : Maison à Énergie positive à Dakar ; Programmes de rénovation de zones urbaines ; etc.
- Un portail d'information dédiée sur la plateforme francophone Médiaterre (www.mediaterre.org/villes/).

Contacts et pour en savoir plus :

Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD)
56, rue Saint-Pierre, 3e étage,
Québec (Québec), G1K 4A1 – Canada
ifdd@francophonie.org

ENERGIES 2050
688 Chemin du Plan, 06410 Biot – France
contact@energies2050.org



ENERGIES 2050 est née de la certitude que les trajectoires de développement de nos sociétés n'étaient pas une fatalité. Depuis 2007 en tant que réseau informel et, depuis 2011, en tant qu'Organisation Non Gouvernementale française sans but lucratif travaillant exclusivement dans l'intérêt général, ENERGIES 2050 contribue sans relâche à la transformation de nos sociétés, pour que nos demains soient porteurs d'un avenir plus humain, pluriel et solidaire.

Rassemblant des membres et des partenaires d'une cinquantaine de nationalités, l'association intervient en France et à l'étranger à la mise en place d'un nouveau modèle de développement résolument positif et solidaire afin de transformer les contraintes en opportunités d'actions. Aventure collective à la recherche d'un mieux-vivre ensemble, ENERGIES 2050 est engagée dans la mise en œuvre de la *Grande Transition*, qu'il s'agisse de la transition énergétique, des villes et des territoires durables ou de la mise en mouvement d'une société plus humaine, plurielle et solidaire, porteuse de paix et respectueuse des biens communs de l'humanité.

ENERGIES 2050 organise ses activités selon 5 axes complémentaires :

- Réaliser des projets de mise en œuvre démonstratifs et reproductibles accompagnés d'études techniques et d'actions de recherche pour témoigner des possibles ;
- Organiser ou participer à des rencontres et à des conférences afin de démultiplier les opportunités d'échanges et de débats ;
- Publier les résultats des recherches afin de mutualiser et de partager les savoirs ;
- Éduquer, former et renforcer les capacités pour que chacun puisse comprendre, connaître et agir ;
- Communiquer au plus grand nombre pour informer, mobiliser et fédérer les envies d'agir.

Les thématiques d'intervention d'ENERGIES 2050 sont l'écodéveloppement et le développement durable ; les politiques climatiques, environnementales et énergétiques ; la transition énergétique ; le développement des sources d'énergies renouvelables ; le tourisme responsable et durable ; le bâtiment et le secteur de la construction ; les défis et les opportunités d'agir des territoires ruraux et urbains ; les villes durables ;

les ressources naturelles et les biens communs de l'humanité ; l'économie de l'écologie et de l'environnement ; les dynamiques entrepreneuriales responsables et la performance des entreprises ; les stratégies de développement bas carbone ; le genre ; l'éducation à l'environnement ; les dynamiques sociales ; les changements de comportement et l'action citoyenne ; l'économie sociale et solidaire.

Les activités d'ENERGIES 2050 s'inscrivent dans une vision permanente de solidarité et d'équité. ENERGIES 2050 plaide pour une implication de l'ensemble des citoyens du Monde dans la mise en place d'un nouveau modèle de développement partagé, à imaginer collectivement.

Les actions et recherches d'ENERGIES 2050 s'inscrivent simultanément au niveau local, point d'ancrage de toute mise en œuvre et laboratoire des actions à élaborer, et au niveau global, car il s'agit de partager et de dupliquer les expériences réussies tout en bénéficiant des leçons tirées des échecs.

ENERGIES 2050
688 chemin du Plan – 06410 Biot – France
contact@energies2050.org – www.energies2050.org
+33 (0)6 80 31 91 89



L'Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD) est un organe subsidiaire de l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF) et son siège est à Québec.

À l'origine dénommé *Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français (IEPF),* l'IFDD est né en 1988 peu après le IIe Sommet de la Francophonie, tenu à Québec en 1987. Sa création faisait suite aux crises énergétiques mondiales et à la volonté des chefs d'État et de gouvernement des pays francophones de conduire une action concertée visant le développement du secteur de l'énergie dans les pays membres. En 1996, l'Institut inscrit les résolutions du Sommet de la Terre de Rio-1992 comme fil directeur de son action et devient *l'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie*. Et en 2013, à la suite de la Conférence de Rio+20, il prend la dénomination *Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD)*.

Sa mission est de contribuer :

- à la formation et au renforcement des capacités des différentes catégories d'acteurs de développement des pays de l'espace francophone dans les secteurs de l'énergie et de l'environnement pour le développement durable ;
- à l'accompagnement des acteurs de développement dans des initiatives relatives à l'élaboration et à la mise en oeuvre des programmes de développement durable ;
- à la promotion de l'approche développement durable dans l'espace francophone ;
- au développement de partenariats dans les différents secteurs de développement économique et social, notamment l'environnement et l'énergie, pour le développement durable.

L'action de l'IFDD s'inscrit dans le Cadre stratégique de la Francophonie, au sein de la mission D « Développement durable, économie et solidarité » et de l'Objectif stratégique 7 « Contribuer à l'élaboration et à la mise en oeuvre du Programme de développement pour l'après-2015 et des Objectifs du développement durable ».

L'Institut est notamment chef de file des deux programmes suivants de la programmation 2015-2018 de l'OIF, mis en œuvre en partenariat avec d'autres unités de l'OIF :

- Accroître les capacités des pays ciblés à élaborer et à mettre en oeuvre des stratégies régionales nationales et locales de développement durable, inclusives, participatives et axées sur les résultats, aux niveaux régional, national et local ;
- Renforcer les capacités des acteurs francophones en vue d'une participation active aux négociations et décisions internationales sur l'économie, l'environnement et le développement durable, ainsi que leur mise en oeuvre.

www.ifdd.francophonie.org



L'Organisation internationale de la Francophonie (OIF) est une institution fondée sur le partage d'une langue, le français, et de valeurs communes. Elle rassemble à ce jour 80 États et gouvernements dont 57 membres et 23 observateurs. Le Rapport sur la langue française dans le monde 2014 établit à 274 millions le nombre de locuteurs de français.

Présente sur les cinq continents, l'OIF mène des actions politiques et de coopération dans les domaines prioritaires suivants : la langue française et la diversité culturelle et linguistique ; la paix, la démocratie et les droits de l'Homme ; l'éducation et la formation ; le développement durable et la solidarité. Dans l'ensemble de ses actions, l'OIF accorde une attention particulière aux jeunes et aux femmes ainsi qu'à l'accès aux technologies de l'information et de la communication.

La Secrétaire générale conduit l'action politique de la Francophonie, dont elle est la porte-parole et la représentante officielle au niveau international. Madame Michaëlle Jean est la Secrétaire générale de la Francophonie depuis janvier 2015.

57 États et gouvernements membres

Albanie • principauté d'Andorre • Arménie • Royaume de Belgique • Bénin • Bulgarie • Burkina Faso • Burundi • Cabo Verde • Cambodge • Cameroun • Canada • Canada-Nouveau-Brunswick • Canada-Québec • République centrafricaine • Chypre • Comores • Congo • République démocratique du. Congo • Côte d'Ivoire • Djibouti • Dominique • Égypte • Ex-République yougoslave de Macédoine • France • Gabon • Ghana • Grèce • Guinée • Guinée-Bissau • Guinée équatoriale • Haïti • Laos • Liban • Luxembourg • Madagascar • Mali • Maroc • Maurice • Mauritanie • Moldavie • principauté de Monaco • Niger • Qatar • Roumanie • Rwanda • Sainte-Lucie • Sao Tomé-et-Principe • Sénégal • Seychelles • Suisse • Tchad • Togo • Tunisie • Vanuatu • Vietnam • Fédération Wallonie-Bruxelles

23 observateurs

Autriche • Bosnie-Herzégovine • Costa Rica • Croatie • République dominicaine • Émirats arabes unis • Estonie • Géorgie • Hongrie • Kosovo • Lettonie • Lituanie • Mexique • Monténégro • Mozambique •pologne • Serbie • Slovaquie • Slovénie • République tchèque • Thaïlande • Ukraine • Uruguay

ORGANISATION INTERNATIONALE DE LA FRANCOPHONIE
19-21, avenue Bosquet, 75007 Paris France
Tél. : +33 (0)1 44 37 33 00
www.francophonie.org

Si le bâtiment durable fait l'objet d'une littérature abondante et peut s'appuyer sur des réglementations, des programmes de certifications spécifiques ou encore des mesures de soutien facilitant son intégration dans un certain nombre de pays, la situation en zones tropicales, particulièrement dans les pays en développement et émergents qui les composent, est souvent plus problématique. L'urbanisation massive et parfois informelle – couplée à des pratiques de conception et de construction peu adaptées à ces régions – a conduit à de nombreux déséquilibres aussi bien environnementaux qu'économiques et sociaux. Ces impacts apparaissent insoutenables que ce soit au regard des objectifs du développement durable que de l'utilisation efficace des ressources naturelles ou de la qualité de vie des habitants.

Le guide « bâtiment durable en régions tropicales » a pour objectif d'apporter des éléments de réponse à ces problématiques et de servir de référence aux professionnels du secteur de la construction et, plus généralement, de l'environnement construit ainsi qu'aux institutions publiques intervenant dans les régions concernées. Il s'inscrit comme une suite du rapport « efficacité énergétique de la climatisation en milieu tropical » publié par l'Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie (2006), en élargissant les problématiques traitées et en intégrant l'ensemble des perspectives énergétiques et environnementales.

Ce Guide s'inscrit dans le cadre des Initiatives francophones pour la promotion des villes durables en Afrique portées par l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF) à travers son organe subsidiaire l'Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD), et par ses partenaires. En particulier, ce Guide est une réalisation concrète de l'Initiative de la Francophonie pour des Villes Durables (IFVD) cofondée par l'IFDD et l'association ENERGIES 2050 en 2011. En ce sens, il se veut également une opportunité pour chacun de questionner ses pratiques professionnelles et de s'inscrire dans des dynamiques de développement et d'aménagements résilients, sobres en ressources naturelles et en carbone, porteuses d'un mieux-vivre partagé et générateur d'activités économiques répondant aux critères du développement soutenable.

Ce premier tome est consacré à **l'intégration des objectifs de durabilité dans la conception des nouveaux bâtiments**. Il est composé de sept chapitres :

Chapitre 1 : Climat et diagrammes bioclimatiques
Chapitre 2 : Stratégies passives dans le bâtiment, bases et concepts
Chapitre 3 : Ventilation et systèmes de refroidissement naturels
Chapitre 4 : Éclairage naturel et intégration avec éclairage artificiel
Chapitre 5 : Systèmes d'air conditionné et climatisation
Chapitre 6 : Énergies renouvelables
Chapitre 7 : Gestion de l'eau.

Le second tome du guide est complémentaire de ce premier et se concentre sur l'efficacité énergétique des bâtiments existants en régions tropicales.



INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE (IFDD)
56, RUE SAINT-PIERRE, 3e ÉTAGE, QUÉBEC (QUÉBEC) G1K 4A1 CANADA
L'IFDD est un organe subsidiaire de l'Organisation internationale de la Francophonie.
www.ifdd.francophonie.org